



**Cláudia Maria  
Pereira Camacho**

**Atenuação e Taxa de Precipitação: Estudo de  
Variabilidade em Aveiro**



**Cláudia Maria  
Pereira Camacho**

**Atenuação e Taxa de Precipitação: Estudo de  
Variabilidade em Aveiro**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e de Telecomunicações (Mestrado Integrado), realizada sob a orientação científica do Professor Dr. Armando Carlos Domingues da Rocha, Professor Auxiliar e do Professor José Carlos Neves, Professor Catedrático, do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

## **O Júri**

Presidente

Prof. Dr. José Fernando da Rocha Pereira  
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Dr. Armando Carlos Domingues da Rocha  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Co-Orientador

Prof. Dr. José Carlos da Silva Neves  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Dr. Victor Daniel Neto dos Santos  
Professor Equiparado a Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Electrotécnica do  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

## **Agradecimentos**

À Universidade de Aveiro, em especial ao Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática e ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro pelas condições de trabalho proporcionadas.

Ao Prof. Dr. Armando Rocha, pelo apoio e motivação dada durante a realização desta tese.

A todos os meus amigos e ao meu namorado que se mantiveram presentes e disponíveis para me ajudar e aturar durante estes últimos meses.

E em especial aos meus pais por todo o sacrifício, paciência e motivação que sempre me deram ao longo do desenvolvimento desta dissertação, sem nunca deixarem de acreditar em mim.

## **palavras-chave**

Comunicações por Satélite, Propagação Terra-Satélite, Atenuação, Taxa de Precipitação, Despolarização, XPD, Medidas Meteorológicas, Variabilidade da taxa de precipitação, HotBird-6, Modelos ITU

## **resumo**

Com o crescimento do mercado das comunicações por satélite a atribuição de serviços a frequências abaixo dos 20 GHz tornou-se muito difícil. Dessa forma, bandas de frequência acima dos 20 GHz são de interesse. Elas permitem a disponibilidade de maiores larguras de banda e a possibilidade de reutilização de frequências em pequenas distâncias. Contudo a tradicional margem de atenuação para 0.01% de indisponibilidade não é realizável a estas frequências devido à maior atenuação. Uma mais profunda caracterização do canal é necessária para avaliar a qualidade de serviço que pode ser oferecida ou até o desempenho alcançável com técnica de mitigação.

O principal objectivo desta tese foi o estudo dos fenómenos de propagação, nomeadamente devidos à precipitação, através da exploração dos dados de propagação e meteorológicos de uma base de dados recolhida em Aveiro e que completou 5 anos. Para caracterizar estes fenómenos, foram analisadas as estatísticas mensais e anuais. Também as estatísticas condicionadas para os mesmos meses do ano -sazonais e bi-horárias- encontram-se apresentadas neste trabalho, pois podem ser úteis para os sistemas de telecomunicações cuja qualidade de serviço pode depender da estação do ano e da hora do dia.

Os resultados obtidos, foram ainda comparados com os modelos existentes e com outros locais a fim de analisar a dependência da atenuação com os parâmetros de ligação.

**keywords**

Satellite Communications, Earth-Satellite Propagation, Beacon Measurements, Attenuation, Rain Rate, Rain Rate Variability, Depolarization, XPD, Meteorological Measurements, Variability, HotBird-6, ITU Models

**abstract**

With the rapid growth of the satellite communications market, the allocation of frequencies below 20 GHz has become very difficult. Thus, frequency bands above 20 GHz are becoming attractive for the satellite communications. They offer higher bandwidths and the possibility of frequency reuse over shorter distances.

However the traditional fade margin for 0.01% of unavailability at Ku band can not be achieved due to higher attenuation. The characterization of the channel is so more demanding to evaluate the quality of service and performance of attenuation mitigation techniques.

The main objective of this thesis was to study the propagation phenomena, particularly due to heavy rainfall through the exploration of a 5 several year propagation and meteorological database that is the first one in Portugal.

To characterize these phenomena, monthly and annual statistics were analyzed. Also, seasonal and daily statistics are presented because they can be useful for telecommunications systems whose quality of service may depend on the season and/or time of day.

The data was collected in the framework of a beacon experiment. The beacon receiver is pointed to the satellite HotBird-6 at 19.7GHz, and collected data between September 2004 and August 2009.

The results are analysed, including the annual, seasonal, monthly and daily variability of the propagation phenomena, and compared with existing models and with other sites.

# Índice

Índice.....	i
Acrónimos.....	iii
Lista de Símbolos .....	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas .....	ix
1     Introdução .....	13
1.1   Visão Geral .....	13
1.2   Utilização da banda Ka.....	13
1.3   Fenómenos de Propagação.....	14
1.4   Motivação .....	15
1.5   Estrutura da Tese.....	16
2     Parâmetros Meteorológicos .....	21
2.1   Atmosfera .....	21
2.2   Temperatura .....	22
2.3   Vapor de água ou Humidade .....	23
2.4   Nuvens .....	24
2.5   Nevoeiro .....	25
2.6   Granizo, Gelo e Neve .....	26
2.7   Chuva.....	27
2.8   Taxa de Precipitação: Modelos disponíveis .....	32
3     Fenómenos de propagação.....	37
3.1   Teoria de "scattering" para partículas individuais.....	37
3.2   Atenuação.....	37
3.3   Despolarização.....	43
4     Análise da Base de Dados.....	51
4.1   Caracterização da experiência .....	51
4.2   Desenvolvimento do software e organização dos dados .....	53
5     Análise dos resultados .....	59
5.1   Atenuação e Taxa de Precipitação.....	59
5.2   Discriminação da Polarização Cruzada - XPD .....	73

6	Conclusões e Trabalho Futuro.....	79
7	Referências.....	83
	Anexo I.....	89
	Anexo II.....	91



## **Acrónimos**

FMT	- Fade Mitigation Techniques
CETUC	- Centro de Estudos em Telecomunicações (Unidade Complementar)
FD	- Diversidade de Frequência
ITU-R	- International Telecommunication Union-Recommendation
ITU	- International Telecommunication Union
XPD	- Discriminação da Polarização Cruzada
NIT	- National Institute of Telecommunications

## Lista de Símbolos

$\rho$	- Humidade absoluta, $[g / m^3]$
RH	- Humidade relativa, [%]
$\rho_s$	- Humidade absoluta em condições de saturação, $[g / m^3]$
$e$	- Pressão parcial do vapor de água, $[hPa]$
$e_s$	- Pressão parcial de saturação do vapor de água, $[hPa]$
$\rho_0$	- Humidade absoluta, $7.5 g / m^3$
P	- Potência do sinal quando atravessa uma célula de chuva
$\alpha$	- Constante de atenuação, $[dB / km]$
D	- Diâmetro das gotas de chuva $[mm]$
$N(D)$	- Número de gotas de tamanho $D$ por $m^3$ , $[mm^{-1}m^3]$
$C(D)$	- Constante de scattering da gota de água
$N_0$	- Constante da distribuição de $N(D)$ , $[mm^{-1}m^3]$
$\Lambda$	- Parâmetro de distribuição de $N(D)$ , $[mm^{-1}]$
R	- Taxa de Precipitação, $[mm / h]$
$R_{0.01}$	- Intensidade de chuva excedida durante 0.01% do tempo, $[mm / h]$
$A_0$	- Atenuação zenital devido ao oxigénio, $[dB]$
$A_w$	- Atenuação zenital do vapor de água, $[dB]$
$h_0$	- Altura equivalente para o oxigénio, $[km]$
$h_w$	- Altura equivalente para o vapor de água, $[km]$
$\gamma_0$	- Atenuação específica do oxigénio, $[dB / km]$
$\gamma_w$	- Atenuação específica do vapor de água, $[dB / km]$
$V_t(p)$	- Valor integrado do vapor de água na atmosfera, $[kg / m^2]$ ou $[mm]$
$L$	- Quantidade total de água, $[kg / m^2]$
$K_l$	- Coeficiente da atenuação específica $\gamma_c$ de nuvens ou nevoeiros, $[(dB / km) / (g / m^3)]$
$A_{0.01}$	- Atenuação excedida durante 0.01% do tempo, $[dB]$
$L_r$	- Perdas causadas pela chuva, $[dB]$
$\gamma_r$	- Constante de atenuação por chuva, $[dB / km]$
$L_e$	- Percorso efectivo da onda na célula de chuva, $[km]$
$k$	- Coeficiente para cálculo atenuação específica (dependente da frequência) num meio com taxa de precipitação R
$\alpha$	- Coeficiente para cálculo da atenuação específica (dependente da frequência) num meio com taxa de precipitação R
$\theta$	- Ângulo de elevação da antena, $[^\circ]$
$\varphi$	- Latitude da estação terrestre, $[^\circ]$
$h_s$	- Altura da estação terrestre em relação ao nível do mar, $[km]$

$h_R$	- Altura da isotérmica de 0°C, [ <i>km</i> ]
$R_e$	- Raio efectivo da Terra, $8.5 \cdot 10^6$ <i>m</i>
$L_S$	- Percurso efectivo da onda na chuva, [ <i>km</i> ]
$L_G$	- Projecção horizontal do percurso da onda na chuva, [ <i>km</i> ]
$r_{0.01}$	- Factor de redução horizontal
$v_{0.01}$	- Factor de ajuste vertical
$E_{11}$	- Campo eléctrico recebido na polarização copolar
$E_{12}$	- Campo eléctrico recebido na polarização ortogonal à copolar
$XPD_{rain}$	- Discriminação da polarização cruzada, apenas devido a chuva, [ <i>dB</i> ]
$XPD_p$	- Discriminação da polarização cruzada, incluindo efeitos de gelo, [ <i>dB</i> ]
$C_{ice}$	- Efeitos de gelo na discriminação da polarização cruzada, [ <i>dB</i> ]
$\tau$	- Ângulo da inclinação da polarização (tilt angle), [°]
$p$	- Percentagem, [%]
$i_{Ry2y}(p\%)$	- Índice de variabilidade anual da taxa de precipitação, [%]
$R_{y2y}(p\%)$	- Taxa de precipitação para o ano genérico <i>y</i> , [ <i>mm / h</i> ]
$R5(p\%)$	- Taxa de precipitação média dos 5 anos, [ <i>mm / h</i> ]
$i_{Ay2y}(p\%)$	- Índice de variabilidade anual da atenuação, [%]
$A_{y2y}(p\%)$	- Atenuação para o ano genérico <i>y</i> , [ <i>dB</i> ]
$A_5(p\%)$	- Atenuação média dos 5 anos, [ <i>dB</i> ]

## Índice de Figuras

Figura 2-1- Efeitos atmosféricos sobre o percurso de propagação .....	21
Figura 2-2- Perfil vertical médio de temperatura na atmosfera .....	23
Figura 2-3- Estágios das nuvens: Altas, Médias e Baixas .....	25
Figura 2-4- Imagens de nevoeiro .....	26
Figura 2-5- Granizo, Gelo e Neve .....	27
Figura 2-6- Formas das gotas de água de chuva .....	28
Figura 2-7- Ângulo de inclinação das gotas como função do seu tamanho e altura do solo (velocidade do vento 1.5m/s) .....	29
Figura 2-8- Diagrama ilustrativo de um sinal de potência P a atravessar uma célula de chuva.....	30
Figura 2-9- Velocidade Terminal das gotas de chuva .....	32
Figura 3-1- Atenuação zenital do oxigénio e vapor de água em condições PTN .....	38
Figura 3-2- Percurso de uma trajectória Terra-Satélite [31] .....	42
Figura 3-3- Esquema do XPD [32] .....	43
Figura 3-4- Diagrama polar de um evento de XPD.....	45
Figura 3-5-XPD só devido a chuva vs XPD com contribuição do gelo.....	46
Figura 3-6- Evento de atenuação e correspondente XPD (6 de Outubro de 2009) .....	46
Figura 4-1- Vista da unidade exterior do sistema de recepção.....	51
Figura 4-2- Diagrama de blocos do sistema de recepção .....	52
Figura 4-3- Vista dos dois pluviómetros e abrigo do Termómetro e do Higrómetro.....	52
Figura 4-4- Organigrama do trabalho desenvolvido na tese .....	53
Figura 5-1- Gráfico da Precipitação Acumulada .....	59
Figura 5-2- Gráfico Anual da Taxa de Precipitação .....	61
Figura 5-3- Gráfico do Índice de variabilidade da Taxa de Precipitação a p%.....	62
Figura 5-4- Gráfico Anual de Atenuação.....	63
Figura 5-5- Gráfico do Índice de variabilidade da Atenuação a p% .....	64
Figura 5-6- Gráfico da Variação Sazonal da Taxa de Precipitação .....	68
Figura 5-7- Gráfico da Variação Sazonal da Atenuação.....	68
Figura 5-8- Variabilidade mensal da Taxa de Precipitação .....	70
Figura 5-9- Variabilidade mensal da Atenuação .....	71
Figura 5-10- Variabilidade diurna da Taxa de Precipitação .....	72
Figura 5-11- Variabilidade diurna da Atenuação.....	72
Figura 5-12- Variabilidade diurna da Atenuação para o mês mais chuvoso.....	73
Figura 5-13- Gráfico Anual do XPD .....	74
Figura 5-14- Variabilidade mensal do XPD.....	75
Figura 5-15- Distribuição Cumulativa Sazonal do XPD .....	76
Figura Anexo 1- M-files das distribuições cumulativas.....	89
Figura Anexo 2- M-files dos mesmos meses do ano.....	89
Figura Anexo 3- M-files das estações do ano .....	90

Figura Anexo 4- M-file da precipitação acumulada.....	90
Figura Anexo 5- Distribuições cumulativas de Atenuação para Budapeste, Józsa, Oberpfaffenhofen, La Coruña, Santiago de Compostela e Vigo .....	92
Figura Anexo 6- Distribuição Cumulativa da Atenuação e Taxa de Precipitação em Spino d'Adda .....	92

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Valores dos parâmetros para distribuição de tamanho de gotas .....	30
Tabela 2- Comparação dos valores de Precipitação Acumulada medidos com as Normais Climatológicas .....	60
Tabela 3- Comparação dos valores de Taxa de Precipitação com os Modelos ITU ....	62
Tabela 4- Comparação dos valores de Atenuação com os Modelos ITU.....	64
Tabela 5- Atenuações obtidas nos locais a comparar .....	66
Tabela 6- Escalonamento da Atenuação com base na frequência .....	67
Tabela 7- Valores de variabilidade sazonal da Taxa de Precipitação e da Atenuação	69
Tabela 8- Anos com maior e menor Atenuação .....	71
Tabela 9- Comparação dos valores do XPD com os modelos ITU.....	74
Tabela Anexo 1- Parâmetros dos satélites usados em medições de outros locais .....	91

# **CAPÍTULO I**

# **1 Introdução**

## **1.1 Visão Geral**

Existe um crescente interesse na utilização de frequências milimétricas para sistemas de comunicações por satélite de forma a oferecer serviços que exigem uma muito maior largura de banda não disponível a frequências inferiores. A chave do êxito dos sistemas que usam bandas milimétricas residirá na adequada modelação dos fenómenos de propagação na atmosfera. Nestas frequências o sinal sofre uma considerável atenuação ao atravessar a atmosfera, devido sobretudo à presença de gases, nuvens, precipitação e é ainda afectado por flutuações devido à turbulência troposférica. É imprescindível caracterizar adequadamente estes fenómenos para garantir uma qualidade de serviço mínima e para implementar técnicas que contrariem os efeitos do canal.

As experiências de propagação constituem uma base para a caracterização dos distintos fenómenos atmosféricos que podem degradar o sinal. A partir destas, é possível elaborar modelos que permitam a estimação dos efeitos da atmosfera sobre o sinal em qualquer frequência e tipo de clima. Além disso, mediante os dados experimentais é possível validar os modelos de previsão já existentes, assim como propor melhorias para minimizar o erro que estes cometeram.

Um importante requisito dos sistemas existentes é a qualidade de serviço, que é quantificada mediante a disponibilidade, expressa em percentagem de tempo, durante o qual esta supera um limiar. Em comunicações por satélite, os períodos de indisponibilidade do link devem-se essencialmente a falhas nos equipamentos ou a desvanecimentos, causados pela atenuação induzida por chuva em particular, mas também por outros fenómenos. Os efeitos da propagação podem causar perdas no serviço durante uns meros segundos assim como durante várias dezenas de minutos, apesar de os números concretos dependerem fortemente do clima. As margens de atenuação do link necessárias para garantir uma certa disponibilidade são muito diferentes, dependendo do tempo para o qual se definem: média anual, estação do ano, pior mês, algum momento do dia, entre outros [1].

## **1.2 Utilização da banda Ka**

Com o crescimento do mercado das comunicações por satélite a atribuição de serviços nas bandas abaixo dos 20 GHz tornou-se muito difícil, desta forma as bandas Ka (em grande desenvolvimento), Q e V despertam um interesse crescente. Elas oferecem maiores larguras de banda, e conseqüentemente uma maior capacidade, e a possibilidade de reutilização de frequências a pequenas distâncias.



No entanto, as limitações impostas pelos fenómenos atmosféricos tornam difícil fornecer serviços via satélite na banda Ka e superiores com níveis de disponibilidade comparáveis aos possíveis a frequências inferiores.

A atenuação induzida por chuva é o fenómeno de propagação mais relevante nesta banda para ligações com alguns dB's de margem de atenuação.

Encontram-se já disponíveis modelos de previsão para a estimação de componentes individuais da atenuação. Contudo as metodologias que tendem a combiná-los de uma maneira coerente não estão geralmente disponíveis. Para terminais terrestres pequenos e portanto baixa margem de atenuação, os efeitos da chuva formam uma pequena parte da margem de propagação total da ligação já que as flutuações do sinal, denominadas cintilação e atenuação de gases e nuvens, poderão ser importantes. É no entanto essencial identificar e prever o impacto individual de cada efeito significativo ao longo do caminho de propagação.

Na falta conhecimento detalhado da probabilidade das ocorrências dos diferentes fenómenos, são feitas abordagens empíricas para estimar estes efeitos. Como os fenómenos de propagação tem origem na troposfera, os parâmetros de entrada dos modelos incluem dados meteorológicos como, taxa de precipitação, nebulosidade, temperatura e humidade que são mais fáceis de medir. Em grande medida a precisão destes métodos depende da disponibilidade de dados meteorológicos fidedignos. Ao conceber uma rede de satélites, é importante ter estes dados disponíveis com uma resolução espacial suficientemente elevada ao longo da área de cobertura do satélite especialmente quando se pretende avaliar o ganho de diversidade.

### **1.3 Fenómenos de Propagação**

Os sistemas de comunicação que operam nesta banda são afectados por factores de propagação, entre eles encontram-se:

- **Atenuação por gases**

A atenuação por gases quando comparada com outros efeitos de absorção é habitualmente pequena. Esta deve-se principalmente à absorção de moléculas de oxigénio e de vapor de água. A atenuação por gases pode ser elevada para frequências perto dos picos de ressonância destas moléculas, diminuindo para frequências mais afastadas. Geralmente, a contribuição do oxigénio é quase constante, enquanto que a atenuação por vapor de água é muito variável devido às elevadas variações de humidade. A absorção do vapor de água aumenta com a humidade relativa assim como com a temperatura [2].

- **Atenuação por nuvens**

Na banda Ka, a atenuação por nuvens depende basicamente do conteúdo de água líquida e da temperatura das gotas que as constituem. Este pode ser um factor muito importante para os sistemas com baixa

disponibilidade (baixa margem de atenuação) devido à maior persistência de nuvens no trajecto do que situações de precipitação. Dependendo do ângulo de elevação e dos tipos de nuvens no local onde se encontra a estação terrestre, os níveis de atenuação por nuvens podem atingir os 3 dB na banda dos 20/30 GHz [2].

- **Atenuação por chuva**

A atenuação por chuva é causada pela absorção e dispersão das gotas de água. É função da frequência, ângulo de elevação, polarização, intensidade da chuva, distribuição de tamanhos e da temperatura das gotas de chuva. A atenuação por chuva é o principal fenómeno que afecta a propagação na banda Ka para pequenas percentagens de tempo, provocando fortes e rápidos desvanecimentos do sinal recebido [2].

- **Despolarização**

Os sistemas de satélite que empregam a reutilização de frequências em termos de polarizações ortogonais podem sofrer interferência através do acoplamento entre polarizações, que se deve a imperfeições nas antenas e à despolarização causada por hidrometeoros. Na atmosfera os hidrometeoros de relevo para despolarização são as gotas de chuva e os cristais de gelo, devido a não serem esféricos e assumirem uma orientação preferencial resultante de efeitos aerodinâmicos e a campos eléctricos aquando da ocorrência de trovoadas.

## **1.4 Motivação**

A banda Ka possui limitações que podem moderar o entusiasmo de a usar se não forem implementadas técnicas específicas no sistema para garantir a capacidade, a disponibilidade e a qualidade do serviço. Como não é possível desenhar um sistema com uma elevada margem de potência para manter uma disponibilidade de serviço requerida, a atenuação do sinal deve ser compensada por outros meios.

Estes meios, conhecidos como FMT (fade mitigation techniques) permitem desenhar sistemas com uma menor margem de atenuação, superando em tempo real a atenuação por nuvens, por chuva, a cintilação e os eventos de despolarização. Estas poderão ir desde o aumento de potências para terminais em dificuldades, alteração da codificação ou tipo de modulação, utilização de diversidade espacial, etc.

Para o correcto projecto de sistemas de comunicações por satélite é imprescindível conhecer os diversos fenómenos atmosféricos que podem degradar o sinal. Poucos são os modelos com uma validade global e com directa aplicação a qualquer tipo de clima. Em geral, as medidas existentes na banda Ka são escassas, sendo por isso necessário realizar novas experiências de propagação. Portanto a recolha de dados, tanto meteorológicos como de propagação, para distintos locais geográficos, frequências e parâmetros da

ligação –azimute, elevação, polarização, etc- é absolutamente essencial para desenvolver novos modelos bem como testar e otimizar os modelos existentes. A necessidade de explorar os fenómenos que afectam esta banda de frequências é de grande importância, sobretudo a chuva, que causa efeitos bem mais severos do que em frequências inferiores.

O principal objectivo desta tese passa pelo estudo dos fenómenos de propagação, nomeadamente devidos à precipitação, através da análise de uma base de dados que completou 5 anos. Esta base de dados é bastante significativa por vários motivos:

- Existe um longo tempo de recolha que torna desde logo os resultados estatísticos mais estáveis;
- Não existem dados deste género na Península Ibérica;
- Os dados da taxa de precipitação são igualmente raros pois os serviços meteorológicos normalmente fornecem apenas a precipitação acumulada ao longo de um período bastante longo;
- Os estudos de variabilidade diária e sazonal tanto da atenuação como taxa de precipitação são igualmente raros na literatura.

Para este estudo foram realizadas estatísticas cumulativas mensais e anuais da atenuação, despolarização e da taxa de precipitação. Também as estatísticas condicionadas para os mesmos meses do ano, sazonais e bi-horárias serão apresentadas, pois podem ser úteis para os sistemas de telecomunicações cuja qualidade de serviço pode depender da estação do ano e da hora do dia.

A percepção da qualidade de serviço pode depender de quando ele é procurado. Alguns eventos em directo, transmitidos via satélite, decorrem em alturas precisas do ano (Jogos Olímpicos) ou a determinadas horas do dia (Jogos de futebol) e por isto a qualidade do serviço percebida pelo cliente não pode ser garantida com base em estatísticas anuais. Ou seja o cliente não atribuirá as falhas às condições de propagação mas sim ao operador.

## **1.5 Estrutura da Tese**

- No Capítulo 2 são apresentados os parâmetros meteorológicos de relevo na propagação do sinal desde os de grande ou média escala, nomeadamente a precipitação (causas, caracterização, tipos de chuva), os factores climáticos bem como os da microestrutura do meio de propagação como a forma e distribuição das gotas de chuva. Aborda-se ainda a medição da taxa de precipitação no contexto deste trabalho. Por fim serão apresentados alguns modelos disponíveis para a taxa de precipitação;
- O Capítulo 3 aborda detalhadamente os fenómenos de propagação e a precipitação, fazendo ainda uma breve referência à atenuação por gases, nuvens e nevoeiro e ainda ao fenómeno de despolarização.

Finalmente serão apresentados os actuais modelos para a atenuação e a sua fundamentação física com alguns artigos de relevo;

- No Capítulo 4 é feita uma descrição da campanha experimental conduzida em Aveiro e é analisada a base de dados, referenciando o percurso desenvolvido para a obtenção das estatísticas cumulativas dos fenómenos de propagação em relevo para esta tese;
- No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos. Estes resultados são ainda comparados com os obtidos noutros locais e que constam de publicações encontradas;
- O Capítulo 6 resume as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho e apresenta propostas de trabalho futuro.

## **CAPÍTULO II**

## 2 Parâmetros Meteorológicos

Este capítulo descreve alguns parâmetros meteorológicos que são a causa dos fenómenos de propagação em relevo nesta tese.

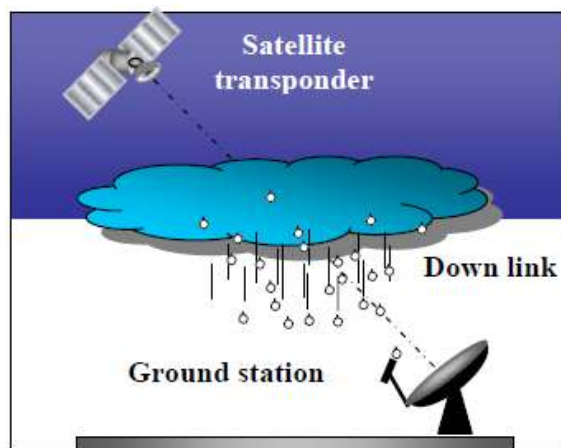


Figura 2-1- Efeitos atmosféricos sobre o percurso de propagação

A chuva é uma forma de precipitação que contrasta com outras como o granizo e a neve. O principal efeito da chuva é a atenuação e a despolarização. As gotas de chuva absorvem e dispersam ondas rádio, resultando na atenuação do sinal e na redução do desempenho ou e, no limite, na indisponibilidade de um sistema.

Também as nuvens e o nevoeiro causam atenuação, em particular a frequências acima dos 20GHz e em ligações com um ângulo de elevação pequeno. Quando as nuvens são formadas por cristais de gelo, pode ocorrer despolarização em detrimento da atenuação que para estes casos não é significativa.

Outras formas de precipitação como o granizo, o gelo e a neve são menos, relevantes na propagação e por esse facto são descritos mais superficialmente neste capítulo.

### 2.1 Atmosfera

A atmosfera terrestre encontra-se dividida em diversas camadas que podem ter uma classificação baseada na variação da temperatura com a altitude. A primeira camada é a troposfera. A troposfera é uma região não ionizada que se estende desde a superfície terrestre até aos 7Km nos pólos e aos 17Km no equador. A troposfera é a camada mais importante ao considerar a propagação de microondas.

Os principais fenómenos que afectam o sinal nesta camada são [2]:

- Absorção e dispersão por gases (principalmente Oxigénio e Vapor de água);
- Cintilação atmosférica;

- Atenuação por chuva e por nuvens;
- Despolarização por chuva e gelo.

A troposfera é constituída por uma grande variedade de gases: Azoto (78%) e oxigénio (21%), sobretudo, mas também Vapor de Água, Dióxido de Carbono e Metano, estes em menor quantidade. Para a propagação na banda Ka e Q/V apenas são considerados o oxigénio e o Vapor de água.

A movimentação de massas de ar em grande escala que encontram outras com distinta humidade e temperatura dá origem às denominadas frentes onde habitualmente ocorre precipitação. Podemos realçar 4 tipos diferentes:

- Frente Fria: origina-se quando uma massa de ar frio se aproxima de uma massa de ar quente. Esta frente caracteriza-se pela ocorrência de nuvens densas, trovoadas e chuva forte. A ocorrência de granizo e neve é possível.
- Frente Quente: origina-se quando uma massa de ar quente se aproxima de uma massa de ar frio. Com a sua passagem poderá surgir precipitação fraca, com aumento da temperatura e subsequente tempo seco.
- Frente Occluded: surge quando uma frente mais rápida, fria ou quente, atinge uma frente mais lenta, quente ou fria, respectivamente. Quando a frente fria é mais rápida, ocorre chuva intensa e constante e a sua passagem leva ao abaixamento da temperatura. No caso da frente quente alcançar a fria, a temperatura sobe, a ocorrência de chuva é fraca e surgem algumas abertas.
- Frente Estacionária: ocorre quando duas massas de ar diferentes se aproximam sem sobreposição dando origem a nuvens e consequente precipitação. Esta frente ocorre na estação quente, o Verão.

## 2.2 Temperatura

A temperatura é um parâmetro meteorológico variável cujo máximo e mínimo ocorrem sensivelmente a meio do dia e antes do crepúsculo matinal, respectivamente. O seu valor é superior no equador e decresce até um valor mínimo nos pólos, ou seja, é inversamente proporcional ao aumento da latitude.

Na troposfera o valor médio da variação vertical da temperatura é de 6,5°C/km. Este valor é na realidade bastante variável, pois algumas vezes a temperatura cresce em finas camadas, resultando numa inversão da temperatura.

A temperatura, devido à sua variabilidade, possui um papel importante principalmente para a intensidade da flutuação do sinal (cintilação).

A figura 2-1 ilustra a variação da temperatura ao longo das diversas camadas da atmosfera

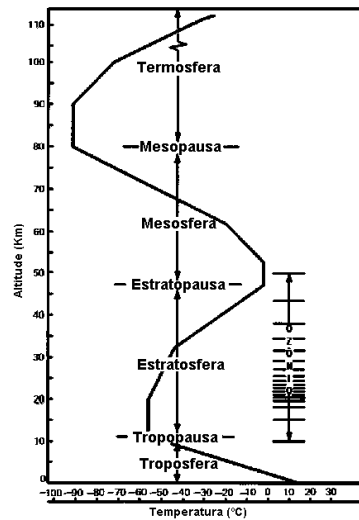


Figura 2-2- Perfil vertical médio de temperatura na atmosfera

## 2.3 Vapor de água ou Humidade

A humidade atmosférica é a quantidade de Vapor de água na atmosfera. Esta quantidade varia consoante o local e é dependente do dia, mês e até estação do ano.

Em semelhança com a temperatura, a humidade é também um parâmetro meteorológico importante, pois o vapor de água é o gás mais variável presente na atmosfera. Dependendo das condições atmosféricas em altitude o vapor de água pode condensar e mesmo dar origem a cristais de gelo. A criação de gotas de chuva ocorre pela fusão deste gelo ou pela captura de umas gotas por outras (mais comum em zonas tropicais). Junto à superfície ocorrem as chamadas condensações superficiais que ocorrem sob a forma de orvalho, geada ou nevoeiro.

A humidade atmosférica pode ser quantificada através da denominada humidade relativa. Existem várias formas de quantificar a humidade relativa: relacionando o valor actual da densidade de Vapor de água ( $g/m^3$ ) com o valor da densidade de Vapor de água em condições de saturação à mesma temperatura, (Equação 2-1); ou relacionando o valor da pressão parcial de Vapor de água com o mesmo em condições de saturação, (Equação 2-2).

$$RH = \frac{\rho}{\rho_s} \quad \text{Equação 2-1}$$

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100\% \quad \text{Equação 2-2}$$



A densidade de saturação aumenta com a temperatura de forma acentuada. Assim uma mesma humidade relativa significa uma maior quantidade de água sob a forma de vapor se a temperatura for maior. Consequentemente, com o aumento da altitude o vapor de água decresce de forma exponencial, efeito aliás levado em consideração pela recomendação ITU-R P.835-4. Ou seja os primeiros 2km de atmosfera contém grande parte do vapor de água e são os mais relevantes para o cálculo da atenuação por este gás.

Os instrumentos de medição da humidade relativa à superfície são os higrómetros de cabelo ou higrómetros eléctricos. Na estação localizada em Aveiro encontra-se instalado um higrómetro de cabelo da *Thies Clima* com uma gama dinâmica de 10% a 90%. A medição directa em altitude faz-se usando balões meteorológicos lançados tipicamente ao meio-dia e à meia-noite.

## 2.4 Nuvens

As nuvens são um conjunto de partículas minúsculas (raios de poucos  $\mu\text{m}$ ) de água – líquida, gelo, ou ambas – em suspensão na atmosfera.

O seu aspecto óptico depende de vários factores como a natureza (vento, temperatura do ar, etc.), dimensões, número e distribuição no espaço das partículas que as constituem, intensidade da luz que recebem, posições relativas do observador e da fonte de luz em relação a estas.

Quanto ao seu aspecto podem ser:

- Estratiformes: nuvens de desenvolvimento horizontal, que cobrem grande área, apresentam pouca espessura e dão origem a precipitação de carácter leve e contínuo.
- Cumuliformes: nuvens de desenvolvimento vertical, em grande extensão, surgem isoladas e dão origem a precipitação forte, em pancadas e localizadas.
- Cirriformes: nuvens de desenvolvimento horizontal. São fibrosas, de aspecto frágil e ocupam as altas atmosferas. São formadas por cristais de gelo minúsculos e não dão origem a precipitação.

Existem três estágios de nuvens:

- Nuvens Altas: base acima de 6km de altura – sólidas;
- Nuvens Médias: base entre 2 a 4km de altura nos pólos, entre 2 a 7km em latitudes médias e entre 2 a 8km no equador – líquidas e mistas;
- Nuvens Baixas: base até 2km de altura – líquidas.



**Figura 2-3- Estágios das nuvens: Altas, Médias e Baixas**

As nuvens são formadas pelo arrefecimento do ar até à condensação da água, devido à subida e expansão do ar. Uma vez formada, a nuvem poderá evoluir, crescendo cada vez mais ou dissipar-se.

O aparecimento das nuvens resulta de vários factores:

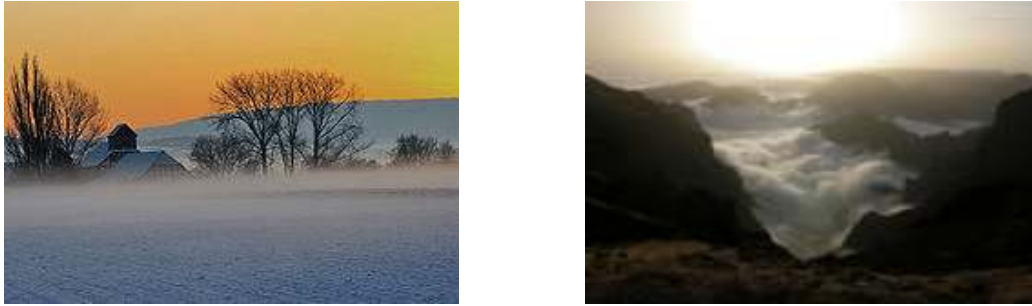
- Arrefecimento do ar abaixo do ponto de saturação ao entrar em contacto com superfícies frias – ao longo de frentes quentes e frias, quando as correntes de ar quente passam por superfícies frias; por convecção quando o ar sobe as encostas das montanhas;
- Mistura de duas massas de ar que se encontram abaixo do ponto de saturação;
- Quando o ar se mantém à mesma temperatura, mas absorve mais Vapor de água antes de atingir o ponto de saturação.

Depois de formadas, as nuvens podem ser transportadas pelo vento no sentido ascendente ou descendente. No primeiro caso a nuvem é forçada a elevar-se e, devido ao arrefecimento as gotículas podem ser total ou parcialmente congeladas. No segundo caso as nuvens podem dissipar-se pela evaporação das gotículas de água. Devido à sua composição instável e de constante modificação de estado, as nuvens podem exhibir turbulência apreciável o que dá origem a fenómenos de cintilação mais intensos do que os observados em céu limpo.

## **2.5 Nevoeiro**

O nevoeiro, também designado por névoa, é uma nuvem constituída por gotículas de água ou cristais de gelo numa camada de ar que se encontra no solo ou perto dele e que é responsável pela redução de visibilidade no solo até 1km.

Encontra-se sobretudo em vales e planícies e a sua altura raramente ultrapassa alguns metros. O nevoeiro forma-se com a condensação do Vapor de água atmosférico, causado pelo arrefecimento da temperatura ao anoitecer. Assim que a temperatura atmosférica aumenta este dissipa-se.



**Figura 2-4- Imagens de nevoeiro**

O nevoeiro produz muito pouca atenuação e, para frequências inferiores a 100GHz é considerado desprezável aproximação que de todo não pode ser considerada para ligações ópticas. Assim sendo, este factor não será tomado em consideração para o estudo desta tese.

## **2.6 Granizo, Gelo e Neve**

Os três fenómenos meteorológicos descritos em seguida não possuem efeitos significativos para a atenuação. Porém, quando o percurso atmosférico de uma ligação é longo, nos casos de baixo ângulo de elevação, já são considerados relevantes.

O estado sólido da água designa-se por gelo. Possui um aspecto vítreo e semitransparente, cuja densidade é inferior à da água e tem uma constante dieléctrica praticamente real. Algumas nuvens altas são maioritariamente constituídas por cristais de gelo sob a forma estereotipada de “agulhas” ou “pratos” que caem tendencialmente na horizontal, podendo então causar despolarização sem que haja atenuação de relevo.

A neve é um fenómeno frequente em regiões de clima frio e temperado. É composta por cristais de gelo sob a forma de flocos que caem sob a superfície terrestre, sendo por isso uma precipitação. Os flocos de neve são pouco densos e por conseguinte pouco relevantes tanto para atenuação como despolarização.

O granizo é constituído por pequenas pedras de gelo que podem ultrapassar os 5mm. Este forma-se quando pequenas partículas de gelo caem dentro das nuvens e recolhem a humidade. A humidade congela e as partículas aumentam de tamanho ao serem elevadas através das correntes de ar. Este ciclo mantém-se até que as partículas se transformem em granizo e tenham peso suficiente para se precipitarem em direcção à Terra. Caem sem orientação preferencial e portanto, mesmo que não esféricos, não dão origem a despolarização.



Figura 2-5- Granizo, Gelo e Neve

## 2.7 Chuva

Na meteorologia, a chuva é a queda de partículas de água no estado líquido, sob a forma de gotas, desde as nuvens até à superfície terrestre.

Para medir a quantidade de chuva utiliza-se um instrumento designado pluviómetro que pode ser de balde (tipping bucket), onde cada balde armazena uma quantidade de água conhecida, e a contagem faz-se cada vez que o balde é esvaziado, ou conta gotas (drop counter), no qual um raio infravermelho é interrompido cada vez que passa uma gota com volume doseado por um conta gotas calibrado. Outros equipamentos existem mas são mais dispendiosos.

À altura de água acumulada ao fim de uma hora de chuva constante chama-se taxa de precipitação e é medida em mm/h. O ITU recomenda que se meça a taxa de precipitação com um tempo de integração de 1 minuto.

Em Aveiro nunca foi registado uma taxa de precipitação superior a 115mm/h usando um tempo de integração de 1 minuto [3].

Em termos espaciais, a precipitação pode ser:

- **Convectiva:** São chuvas intensas e passageiras que apenas cobrem uma área limitada tipicamente em forma de coluna. Têm origem em nuvens de grande desenvolvimento vertical (cumulonimbos e cumulus) e devem-se à rápida ascensão do ar instável, sem a troca de energia com o meio à volta. Nos radares meteorológicos aparecem como regiões em forma de colunas quase verticais de maior reflectividade.
- **Estratiforme:** São chuvas com pouca intensidade mas duradouras. Provêm de nuvens com desenvolvimento horizontal, cobrindo uma área maior. Nos radares meteorológicos apresentam-se sob a forma de uma camada delgada de maior reflectividade denominada banda brilhante (bright band). A precipitação encontra-se horizontalmente estratificada com chuva até à altura da banda brilhante, neve até uns 7 km de altura e cristais de gelo rondando os 9 km.

São ainda de salientar as chuvas frontais, e as orográficas.

As primeiras formam-se com o encontro de uma massa fria com uma quente. A massa de ar quente sobe e arrefece, condensando, formando a precipitação. As segundas ocorrem com a ascensão e arrefecimento dos ventos húmidos ao se depararem com uma barreira montanhosa, comum nas regiões litorais. Quando a chuva ultrapassa os 10mm/h, consoante a frequência, a sua atenuação é significativa relativamente à atenuação por nuvens.

Em climas temperados apenas se verificam os dois primeiros tipos de chuva. No entanto, nem sempre surgem isolados, pois em muitas ocasiões os eventos de precipitação são uma combinação de ambos, ou seja, por vezes o início de um evento é caracterizado por chuva estratiforme seguida de chuva convectiva o resto do tempo.

### 2.7.1 Gotas de Chuva

A chuva é composta por um conjunto de gotas, que são caracterizadas por quatro parâmetros fundamentais, nomeadamente a sua forma e orientação, a distribuição do tamanho das gotas, a sua temperatura e velocidade terminal de queda.

### 2.7.2 Forma e orientação dos hidrometeoros

As gotas de chuva, quando comparadas com as gotículas presentes nas nuvens apresentam um tamanho superior, não sendo possível manterem-se suspensas no ar, originando precipitação.

As gotas mais pequenas, com menos de 2 mm de diâmetro, existem em maior quantidade e apresentam uma forma esférica. Ao cair, as gotas deformam-se devido ao efeito da gravidade e da tensão superficial da gota e assumem a forma de um esferóide oblato, mantendo um eixo de simetria quase vertical, apesar da sua orientação se inclinar uns graus devido à força horizontal gerada pelo gradiente da velocidade do vento com a altura. A figura seguinte ilustra esta evolução.

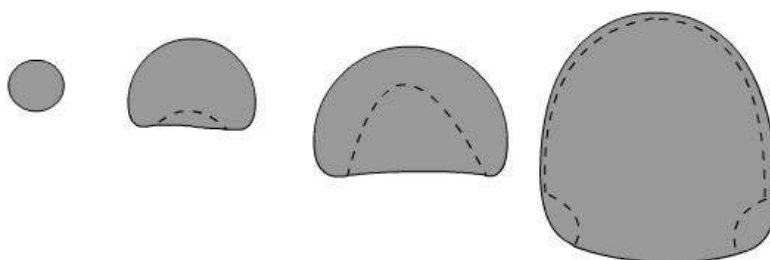


Figura 2-6- Formas das gotas de água de chuva

O modelo mais utilizado para determinar as formas das gotas em função do seu tamanho foi desenvolvido por Pruppacher & Pitter [4] com túneis de vento. Para diâmetros muito pequenos as gotas evaporam-se com rapidez, enquanto que para diâmetros muito grandes, a tensão superficial não é suficiente para manter a coesão e a gota é dividida em gotas menores durante a queda [1].

O modelo físico de Brussaard [5] é usado normalmente para caracterizar a orientação das gotas. Este tem em conta as forças da gravidade e aerodinâmicas. O modelo deste autor chega à conclusão que o ângulo de inclinação é inversamente proporcional ao aumento da altura, pois o gradiente do vento é também menor, como é possível ver pela figura 2-6 [6]. É verificado que para gotas com raio de até 2 mm, o ângulo de inclinação aumenta. Por outro lado, em gotas maiores o ângulo mantém-se praticamente constante e salvo para pontos próximos do solo, a orientação das gotas é quase vertical, com inclinações em torno de 1° a 3° [1].

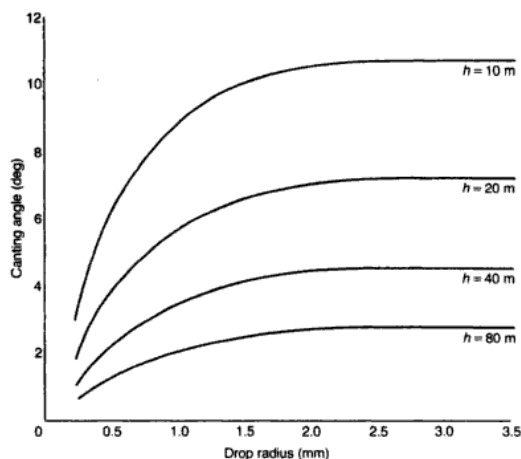


Figura 2-7- Ângulo de inclinação das gotas como função do seu tamanho e altura do solo (velocidade do vento 1.5m/s)

### 2.7.3 Distribuição do Tamanho das Gotas

A distribuição do tamanho das gotas de chuva, ao contrário da forma e orientação das gotas, pode ser relativamente estável variando fundamentalmente com a intensidade da precipitação. A sua medição permite caracterizar melhor a constante de propagação e a evolução dos eventos de atenuação, de forma a classificar os tipos de chuva e realizar variados estudos climáticos.

O primeiro modelo desenvolvido para a determinação do tamanho das gotas de chuva foi o de Laws & Parson em 1943 e era baseado em medições para intensidades até 50 mm/h. Mais tarde, Marshal & Palmer [7] desenvolveram modelos, nos quais a distribuição era definida por uma exponencial negativa. Também Joss apresentou um modelo baseado numa exponencial negativa, mas diferenciou as distribuições dos tamanhos das gotas para alguns tipos de chuva, nomeadamente as chuvas convectivas e estratiformes [1].

A distribuição do tamanho das gotas de chuva é então dada pela Equação 2-3, onde  $N(D)$  é o nº de gotas de tamanho  $D$  por  $m^3$ .

$$N(D) = N_0 \times e^{-\Lambda \cdot D} \quad \text{Equação 2-3}$$

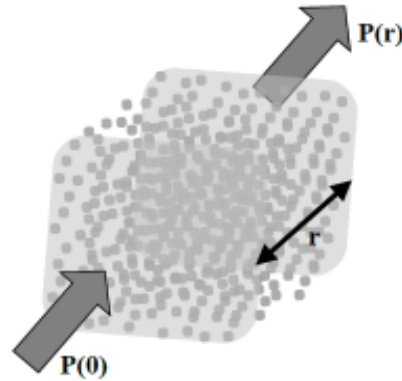
Nesta,  $N_0$  é uma constante e  $\Lambda$  é uma função dependente da taxa de precipitação  $R$ , e pode ser aproximada através destas distribuições. [8].

**Tabela 1- Valores dos parâmetros para distribuição de tamanho de gotas**

Tipos de distribuição	$N_0 [mm^{-1}m^3]$	$\Lambda [mm^{-1}]$
<b>Marshall e Palmer</b>	8000	$8,2 \times R^{-0,21}$
<b>Joss Drizzle</b>	3000	$11,4 \times R^{-0,21}$
<b>Joss Thunderstorm</b>	1400	$6 \times R^{-0,21}$

A variabilidade da distribuição de tamanhos das gotas de chuva em zonas climáticas diferentes tem sido uma preocupação no desenvolvimento de modelos de atenuação por chuva, numa base global. Para o fazer, é necessário conhecer a variabilidade da atenuação que pode ocorrer devido à alteração na distribuição de tamanhos das gotas de chuva numa região particular [9]. Os modelos existentes são, por norma, baseados na teoria de scattering, recorrendo à distribuição de tamanhos, forma e temperatura das gotas de chuva.

Um sinal de potência  $P$  quando atravessa uma célula de chuva pode ser descrito da seguinte forma:



**Figura 2-8- Diagrama ilustrativo de um sinal de potência  $P$  a atravessar uma célula de chuva**

$$P(R) = P(0) \times e^{-\alpha \cdot r} \quad \text{Equação 2-4}$$

Onde  $\alpha$  representa a constante de atenuação através de uma população de gotas de diâmetro  $D$ , com uma determinada distribuição de tamanhos, e é dada por:

$$\alpha = \int_0^{\infty} N(D) \times C(D) \cdot dD \quad \text{Equação 2-5}$$

Onde  $C(D)$  é um parâmetro de scattering da gota.

Nas últimas décadas foram propostos modelos baseados em distribuições log-normal, gamma ou Weibull. Contudo, persiste uma grande incerteza, quando surgem gotas de chuva com diâmetro muito pequeno, pois são difíceis de detectar e registrar e, o seu número varia bruscamente devido à pequena massa e baixa velocidade de queda. Esta incerteza é maior para frequências mais elevadas, nas quais as gotas pequenas têm mais influência no cálculo da atenuação.

O ITU adoptou uma aproximação simples que relaciona a constante de atenuação com a taxa de precipitação que é do tipo Power Law como veremos.

#### **2.7.4 Disdrómetro**

A medição da distribuição dos tamanhos das gotas de chuva é feita com um instrumento designado disdrómetro que permite identificar a evolução da precipitação durante um evento de chuva, isto é, o tamanho das gotas, a sua forma, a deformação na queda, o ângulo de inclinação e a sua velocidade. Através do disdrómetro foi possível verificar que, por norma, no início de um evento as gotas de chuva de maior tamanho são dominantes, enquanto que as gotas mais pequenas aparecem em maior quantidade na fase final do evento [10].

Foi também visto que as gotas maiores encontram-se associadas a chuvas convectivas e as menores a chuvas estratiformes.

#### **2.7.5 Velocidade Terminal**

Para determinar a intensidade da chuva a partir da distribuição das gotas, é necessário modelar as velocidades de queda das partículas de chuva. A velocidade de queda de uma gota de chuva aumenta até que o atrito do ar iguale a força de gravidade. À medida que a gota cai, a velocidade da sua queda tende a tornar-se constante.

A esta velocidade constante chama-se velocidade terminal. As gotas maiores possuem uma superfície com menor área comparada com o seu peso, logo caem mais rapidamente até atingir a sua velocidade terminal.

O modelo mais utilizado é o de Gunn e Kinzer [11, 12] que relaciona a velocidade terminal das gotas de chuva com o tamanho das mesmas, em ar estagnado. Segundo este modelo, a velocidade terminal aumenta com o raio da gota até um máximo de 9 m/s para 2.5 mm aproximadamente.



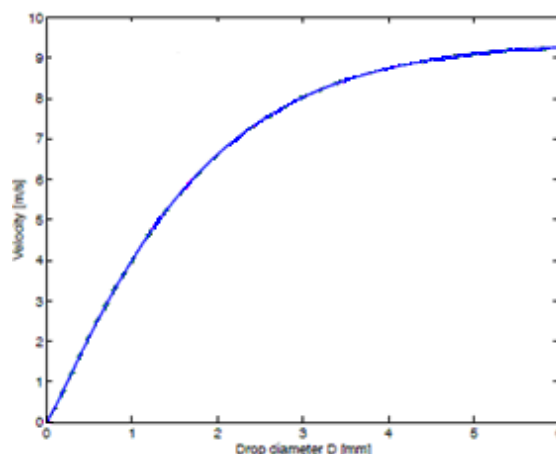


Figura 2-9- Velocidade Terminal das gotas de chuva

### 2.7.6 Temperatura das gotas

Normalmente a temperatura das gotas de chuva em queda é próxima da temperatura do ar circundante. No entanto, em regiões de correntes de ar ascendentes, tempestades convectivas e de nuvens muito frias, podem surgir pequenas gotas de chuva a temperaturas abaixo dos 0°C. Também se podem produzir partículas de gelo e água em regiões de correntes descendentes abaixo da altura da isotérmica de 0°C.

As variações da temperatura das gotas, em relação ao valor suposto, apenas têm importância para frequências inferiores a 20 GHz, podendo ser a causa de divergências de até uns 20% na atenuação [1].

## 2.8 Taxa de Precipitação: Modelos disponíveis

Caracterizar estatisticamente a taxa de precipitação no local da ligação Terra-Satélite é bastante importante para o desenvolvimento de técnicas de mitigação de atenuação por ela causada assim como para melhorar o desempenho, disponibilidade e qualidade do serviço.

Em seguida encontram-se descritos alguns dos modelos desenvolvidos que permitem estimar a taxa de precipitação de um local, à falta de medidas recolhidas no mesmo local, e que são muito utilizados no planeamento de sistemas de comunicações por satélite [13].

### ITU-R Modelo Global de Taxa de Precipitação

O modelo ITU de taxa de precipitação fornece mapas numa grelha de coordenadas geográficas que permitem, através de equações, obter resultados por interpolação para um determinado local, caso não haja valores medidos nesse mesmo local. Para esta tese foram utilizados os resultados dos modelos ITU-R P.837-4 e o ITU-R P.837-5 para Aveiro como termo de comparação com os nossos resultados.

Para calcular a atenuação por chuva prevista através das recomendadas medições locais são necessárias as estatísticas de taxa de precipitação com 1 minuto de tempo de integração [14].

### **Modelo Global de Taxa de Precipitação de Crane**

O modelo de Crane [15] datado de 1980 dividiu o globo em 8 regiões, baseadas na acumulação total de chuva e no número de tempestades.

A distribuição da taxa de precipitação baseou-se em medidas indirectas de dados de precipitação durante 7 anos em 15 estações em Inglaterra e a Este de Nova Iorque. As fronteiras para cada região climática foram ajustadas para se adaptarem a variações locais, particularmente tempestades e monções e, em geral, à circulação atmosférica e a latitude.

### **Modelo de Moupfouma para taxa de precipitação**

Neste modelo datado de 1984, Moupfouma [16, 17] atribuiu uma distribuição log-normal a taxas de precipitação baixas e uma distribuição gamma a taxas de precipitação elevadas. É um bom modelo para climas tropicais e temperados.

O modelo requer 2 parâmetros que são coeficientes dependentes do clima local e das características geográficas, e da intensidade de chuva excedida durante 0.01% do tempo.

Para estimar  $R_{0.01}$ , o modelo de Chebil [16, 17] é bom e permite o uso de uma acumulação média anual de precipitação longa (M) no local (mm/ano). Com este modelo é ainda possível especificar a distribuição cumulativa da taxa de precipitação, através da mesma excedida para uma fracção de tempo e do declive da curva de distribuição cumulativa da chuva.

### **Modelo de Rice-Holmberg**

Outra aproximação para obter os valores da taxa de precipitação para uso em cálculos de desvanecimento é o modelo de Rice-Holmberg [1]. Este modelo foi desenvolvido em 1973 após uma análise feita com medidas de estações dentro e fora dos EUA, incluindo distribuições cumulativas de chuva, acumulação mensal máxima de chuva e um mapa com as mais elevadas taxas esperadas num período de 2 anos. O resultado do estudo -uma aproximação empírica- é uma metodologia para obter uma distribuição cumulativa pontual da taxa de precipitação baseada em parâmetros obtidos de análises de dados locais de acumulação de chuva.

Foi verificado que este modelo sobrestima as taxas de precipitação para 0.01% e subestima entre 0.1% e 1%. Apesar do modelo ser antigo, o facto de se basear em medidas locais faz dele uma alternativa a considerar como foi apontado em [17]. Uma vantagem deste método é o facto de ser possível determinar a distribuição cumulativa baseada em dados com longo tempo de integração que estão disponíveis nos serviços meteorológicos.

## **CAPÍTULO III**

### **3 Fenómenos de propagação**

Nesta secção são caracterizados alguns dos fenómenos de propagação que ocorrem numa ligação Terra-Satélite e que são os responsáveis pela degradação do sinal microondas que se propaga na troposfera.

São os factores meteorológicos, descritos no capítulo anterior, que originam estes fenómenos e influenciam, uns mais do que outros, o comportamento do sinal consoante o local onde está instalado o sistema de recepção.

É ainda necessário ter em conta outros parâmetros, como são o ângulo de elevação da antena, o ângulo de azimuth, o ângulo de inclinação da polarização, o diâmetro da antena do receptor e a frequência, sendo esta última de grande influência para todos fenómenos.

#### **3.1 Teoria de "scattering" para partículas individuais**

Para descrever o meio de propagação, é importante caracterizar os hidrometeoros relativamente ao seu tamanho, temperatura, forma e estado físico, bem como a sua distribuição ao longo do caminho de propagação. Quando uma onda incide num hidrometeoro, é atenuada devido ao scattering e também devido ao facto de a energia ser absorvida como resultado da excitação de campos no volume de água.

Soluções analíticas, como as de Mie e de Rayleigh, têm sido utilizadas em circunstâncias muito particulares. Outros métodos de cálculo numérico como o T-Matrix são populares [18].

A aproximação de Rayleigh é bastante usada para pequenas partículas e caracteriza-se pelo facto da amplitude de "scattering" ser proporcional ao volume do hidrometeoro e ao quadrado da frequência. O seu uso também parece adequado na previsão da despolarização de cristais de gelo até 30 GHz [19]. A solução de Mie é usada para partículas esféricas. Apesar de ser exacta é matematicamente complexa, e por isso é habitual recorrer a aproximações numéricas.

#### **3.2 Atenuação**

De entre os fenómenos que afectam os sistemas de telecomunicações, a atenuação é o que causa maiores contrariedades: diminui a amplitude do sinal e causa um aumento de temperatura de ruído do sistema. São vários os factores que lhe dão origem, nomeadamente os gases, as nuvens, o nevoeiro e a chuva.

### 3.2.1 Atenuação por gases

A atenuação provocada pelos gases presentes na atmosfera, quando comparada com os outros efeitos, é relativamente pequena. No entanto, para sistemas com baixa margem de atenuação e sobretudo para ângulos de elevação baixos, onde o trajecto dentro da baixa atmosfera se torna longo, este valor torna-se significativo.

A atenuação devida aos gases atmosféricos é causada principalmente pela absorção de moléculas de oxigénio e Vapor de água [20]. A atenuação devida ao oxigénio apresenta um pico próximo dos 60 GHz originado por um complexo ressonante desta molécula. O momento magnético desta molécula produz também uma linha à frequência zero, denominado espectro não ressonante ou de Debye. A molécula de Vapor de água tem um espectro de absorção que apresenta uma frequência de ressonância a 22.2 GHz originando um pico na atenuação [21]. A figura seguinte ilustra a atenuação específica devida ao oxigénio e vapor de água para frequências de 1 a 350 GHz em condições PTN [22]

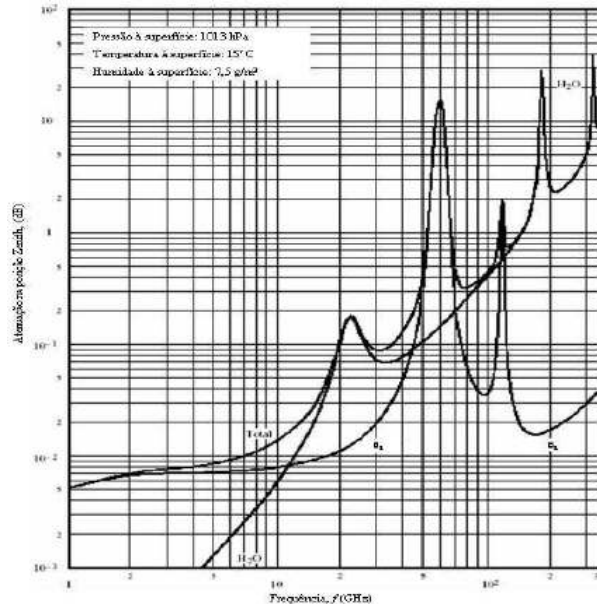


Figura 3-1- Atenuação zenital do oxigénio e vapor de água em condições PTN

A atenuação por gases pode ser calculada através da Equação 3-1, onde  $A_0 = h_0 \cdot \gamma_0$  e  $A_w = h_w \cdot \gamma_w$  são a atenuação no zénite devido ao oxigénio e ao vapor de água, respectivamente e  $\theta$  é o ângulo de elevação.

$$A = \frac{A_0 + A_w}{\sin \theta} \quad \text{Equação 3-1}$$

Outra forma de a calcular é através do conteúdo de vapor de água integrado, Equação 3-2,

$$A(p) = \frac{A_0 + A_w(p)}{\sin \theta} \quad \text{Equação 3-2}$$

onde  $A_w(p)$  é obtido por:

$$A_w(p) = \frac{V_t(p) + \gamma_w(p)}{\rho}$$

Equação 3-3

com  $V_t(p)$ ,  $\gamma_w(p)$  e  $\rho$ , o conteúdo integrado de vapor de água excedido durante uma percentagem de tempo  $p$  ( $Kg/m^2$ ), a atenuação específica do vapor de água ( $dB/Km$ ) e o valor médio da densidade de vapor de água à superfície ( $g/m^3$ ), respectivamente.

Existem vários modelos de previsão da atenuação por gases. Nuns casos, os modelos estimam a atenuação a partir de variáveis meteorológicas, tais como a temperatura, a humidade e a pressão. Outros modelos requerem o perfil vertical de vários parâmetros meteorológicos. Nestes últimos destaca-se o modelo ITU-R 676-5 [22], que se baseia no modelo Milimeter Wave Propagation de Liebe e, mais recentemente, o modelo Atmospheric Transmission at Microwaves, que corrige alguns dos problemas do anterior [1, 23].

### 3.2.2 Atenuação por nuvens

Na banda Ka, as nuvens que contém água líquida, contrariamente às nuvens de gelo, podem produzir uma atenuação não desprezável. O tamanho reduzido das gotas de água presentes nas nuvens faz com que sejam consideradas como scatters de Rayleigh.

Esta atenuação pode ser a principal causa de degradação em sistemas de baixa disponibilidade e possui maior relevo para frequências muito elevadas (acima de 100GHz).

A contribuição da nebulosidade acima dos 10 GHz, quando comparadas com as causadas pela chuva, são geralmente mais fracas, mas podem estar presentes durante percentagens de tempo maiores, já que a nebulosidade, qualquer que seja o tipo, existe em média durante 54% do tempo sobre a superfície terrestre [24] embora em Aveiro tenha sido estimada anteriormente em cerca de 5 a 10% do ano.

Uma base para a previsão da atenuação por nuvens é a teoria da dispersão para partículas isoladas, em concreto, a aproximação de Rayleigh. Todavia a sua aplicação não é directa devido à complexidade física das nuvens e à escassez de dados sobre a composição e espessura destas. Realmente, a caracterização correcta da influência das nuvens sobre a propagação em frequências milimétricas requer uma grande variedade de características, algumas das quais não se encontram suficientemente definidas, nomeadamente:

- Distribuição do tamanho das partículas que constituem as nuvens;
- Forma e Temperatura das partículas;

- Extensão vertical e horizontal das nuvens;
- Distribuição espacial no interior das nuvens das duas primeiras características;
- Relação entre as características anteriores e o tipo de nuvem;
- Probabilidade de surgir cada tipo de nuvem num clima particular.

Uma forma de calcular a atenuação, Equação 3-4, específica por nuvens é relacionando a atenuação específica por densidade de água no meio  $K_l$  ( $dB/Km$ )/( $g/m^3$ ) com a quantidade total de água  $L$  ( $Kg/m^2$ ) e o ângulo de elevação  $\theta$  ( $^\circ$ ).

$$A = \frac{L \cdot K_l}{\sin \theta} \quad \text{Equação 3-4}$$

Em geral é preferível realizar o cálculo da atenuação a partir do conteúdo de água líquida numa coluna vertical. O ITU providencia uma recomendação [25] onde dá, com base nas coordenadas do local, o conteúdo de água líquida excedido durante uma determinada percentagem de tempo.

O modelo DAH [26] também obtém a atenuação a partir do conteúdo de água líquida. Neste caso os dados são estimados a partir de estatísticas locais de aparição de diversos tipos de nuvens, às quais são atribuídas certas propriedades (extensão horizontal e vertical, densidade de água líquida). No modelo Salonen-Uppala [27] as radiosondas registam os perfis verticais de parâmetros meteorológicos para detectar as nuvens e calcular o seu conteúdo de água líquida.

Para a medição da atenuação, desde o solo, devido a nuvens é recomendado o uso de um radiómetro, pois é difícil de obter com o auxílio de dados conseguidos pela monitorização de balizas de satélite.

### 3.2.3 Atenuação por chuva

A atenuação devido à chuva é o factor que causa mais danos na propagação do sinal, apesar dos seus efeitos estarem limitados a percentagens relativamente pequenas de ocorrência de precipitação: entre 2 a 5% do ano, como já foi referido.

A atenuação por chuva é função da frequência, da intensidade da chuva e dos parâmetros de ligação, como já foi referido. Ela cresce com a frequência, devido ao aumento do número de colisões entre as partículas de água e, com a intensidade da chuva, devido ao aumento do número de gotas de chuva que o sinal tem de atravessar. A atenuação aumenta com a diminuição do ângulo de elevação da antena da estação terrestre direccionada ao satélite porque o caminho percorrido pelo sinal é maior.

Os parâmetros fundamentais para calcular a atenuação por chuva ao longo do caminho de propagação são: a atenuação específica  $\gamma_r$ , definida como a

atenuação da chuva por unidade de distância ( $dB/Km$ ) e o percurso efectivo  $L_e$  ( $Km$ ), que tem em conta o tamanho da célula de chuva e as não homogeneidades da chuva ao longo do percurso de propagação.

Para o cálculo da atenuação específica foram desenvolvidos métodos teóricos rigorosos que têm em conta as propriedades das gotas de chuva descritas no capítulo anterior. No entanto o seu emprego não é prático, devido à complexidade das fórmulas. Por esse motivo foi desenvolvida uma solução empírica que expressa a atenuação específica de forma simples, em função da taxa de precipitação, frequência e polarização da onda e que é dada por:

$$\gamma_r = kR^\alpha \quad \text{Equação 3-5}$$

Onde,  $k$  e  $\alpha$  são coeficientes que se encontram-se tabelados ou podem ser calculados através de fórmulas presentes nas recomendações.

A atenuação por chuva pode então ser calculada pela Equação 3-5.

$$A_r = \gamma_r \cdot L_e \quad \text{Equação 3-6}$$

Os modelos que caracterizam a atenuação por chuva permitem obter a distribuição cumulativa da mesma ou seja, obter a % de tempo durante o qual a atenuação supera um determinado valor.

Um modelo que pode obter esta distribuição para uma estação particular usando estatísticas da taxa de precipitação é o modelo de Crane. Este modelo emprega informação meteorológica sobre a intensidade e a estrutura espacial das células de chuva e também prevê, de ano para ano e de estação para estação, a variação esperada da atenuação para uma dada percentagem do ano. As fronteiras de cada região climática foram ajustadas às suas respectivas variações de atenuações por chuva [28].

O modelo CETUC baseia-se na distribuição cumulativa da taxa de precipitação pontual como função para a previsão da atenuação por chuva. A atenuação por chuva é dada pelo produto da atenuação específica e o comprimento efectivo, e neste caso ambos os parâmetros são determinados em função da percentagem de tempo  $p$ .

O modelo de Moupfouma para prever a atenuação por chuva usando o percurso efectivo baseou-se em estudos feitos, no Congo, Japão, Estados Unidos e Europa, para vários parâmetros e extensão de percurso.

Para o modelo de Garcia [12] é utilizada uma base de dados que é uma extensão da base de dados do ITU-R, à qual foram adicionadas medições realizadas na região Sudeste do Brasil.

O modelo de atenuação ITU-R P.618.8 [29], é uma ampliação do modelo DAH [26], que propõe uma distribuição log-normal tanto para a intensidade de chuva como para a atenuação. Com este modelo é possível ter uma estimativa das estatísticas cumulativas de atenuação por chuva num determinado local,



até uma frequência de 55GHz. Para as calcular são necessários os seguintes parâmetros:

- $R_{0.01}$  - taxa de precipitação local para 0.01% do tempo em média num ano;
- $h_s$  - altura da estação terrestre em relação ao nível do mar;
- $\theta$  - ângulo de elevação ( $38^\circ$ );
- $\varphi$  - latitude da estação terrestre ( $40.63^\circ\text{N}$ );
- $f$  - frequência (19.7GHz);
- $R_e$  - raio efectivo da Terra (8500Km);
- $\tau$  - ângulo de polarização ( $23^\circ$ ).

Para o cálculo da taxa de precipitação excedida para 0.01% do tempo foram utilizados os modelos ITU-R P.837-4 [30] e ITU-R P.837-5 [14] e os dados do nosso local. A partir deste valor e recorrendo ao modelo ITU-R P.838-2 [31] foi possível determinar o valor da atenuação específica em função da taxa de precipitação,  $\gamma_R$  (dB/km).

Para determinar o percurso equivalente de chuva que a onda percorreu, foi necessário obter o valor médio da altura da chuva  $h_R$  (isotérmica de  $0^\circ\text{C}$ ) em relação ao nível do mar, pelo modelo ITU-R P.839-3 [32]. O valor da atenuação devido a chuva é calculado através do modelo ITU-R P.618-8 [20].

Não esquecendo o factor de redução horizontal  $r_{0.01}$  e o factor de ajuste vertical  $v_{0.01}$  obtém-se o percurso efectivo da onda para o nosso local  $L_e$  (km). Finalmente calcula-se a atenuação total prevista para 0.01% do tempo  $A_{0.01}$  (dB), multiplicando a atenuação específica pelo percurso efectivo da onda.

A figura seguinte representa o percurso numa trajectória Terra-Satélite de forma a facilitar a compreensão do modelo [33].

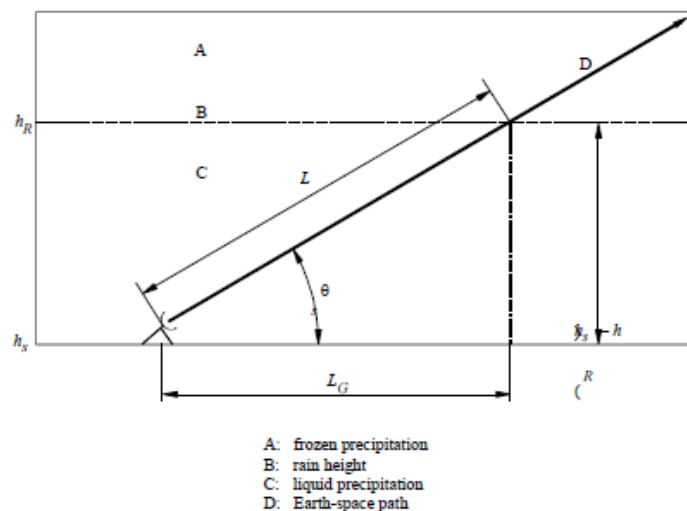


Figura 3-2- Percurso de uma trajectória Terra-Satélite [33]

Para calcular a atenuação excedida para outras percentagens de tempo do ano, entre 0.001% e 5% é utilizado o valor da atenuação para 0.01% do tempo.

### 3.3 Despolarização

Uma possibilidade de aumentar a capacidade de um sistema será efectuar o re-uso da frequência pela emissão de duas polarizações ortogonais [2]. Todavia o acoplamento de sinal de uma polarização para a sua ortogonal poderá comprometer o sistema pois causará interferência.

Uma onda rádio poderá não conseguir preservar o seu estado de polarização, porque a energia é transferida da polarização original – copolar – para a polarização ortogonal a esta – crosspolar –, resultando numa interferência caso se usem as duas polarizações para transmissão. A despolarização produz-se quando o sinal se propaga através de meios anisotrópicos em relação à polarização incidente. Pode ser gerada tanto na ionosfera (rotação de Faraday) como na troposfera (despolarização por precipitação ou gelo) [1].

O parâmetro que é medido habitualmente em receptores de propagação é a discriminação da polarização cruzada (XPD), que se define como a relação entre a amplitude copolar recebida num canal  $E_{11}$  e a amplitude na polarização ortogonal (resultante da transferência da polarização original)  $E_{12}$ , ambos procedentes do mesmo sinal transmitido, representado na Equação 3-6 [34].

$$XPD = 20 \log \frac{|E_{11}|}{|E_{12}|} \quad \text{Equação 3-6}$$

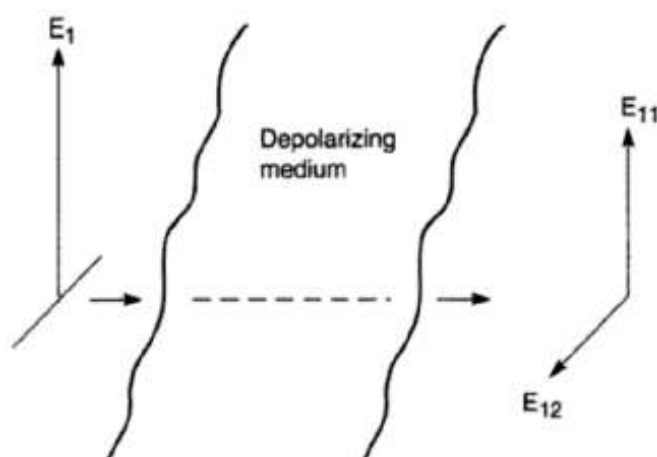


Figura 3-3- Esquema do XPD [34]

A despolarização pode ser provocada por hidrometeoros (partículas de chuva ou gelo) ou por propagação multipercurso. A despolarização provocada por chuva e por gelo pode ser um problema nas bandas de frequência acima

dos 3 GHz. A despolarização por multipercurso é geralmente limitada a um ângulo de elevação muito baixo e será dependente das características de polarização da antena receptora.

A importância da despolarização nos sistemas de telecomunicações depende de vários factores:

- Frequência da ligação;
- Geometria do trajecto: ângulo de elevação, ângulo de inclinação da polarização, etc;
- Factores climáticos locais;
- Sensibilidade do sistema à interferência por polarização cruzada.

Nos sistemas que funcionam com apenas uma polarização, a despolarização produz um pequeno incremento na atenuação no trajecto. A degradação resultante pode ser muito significativa para baixos ângulos de elevação pois como as gotas têm uma forma esferoidal de revolução ao longo do eixo vertical, o meio apresentará anisotropia máxima para uma elevação nula a qual tenderá a diminuir com o ângulo de elevação.

### 3.3.1 Despolarização devido a chuva

Como já foi referido antes, a água líquida presente na atmosfera pode ser apresentada sob a forma de chuva, nuvens e nevoeiros. As gotas que constituem as nuvens e o nevoeiro não causam despolarização, pois são gotas muito pequenas e esféricas.

A despolarização induzida por chuva está ligada à denominada anisotropia de um meio idealmente longitudinalmente homogéneo: ou seja a constante de atenuação diferencial integrada no caminho ao longo de duas direcções ortogonais que definem com a direcção de propagação os denominados planos principais. Uma onda com polarização linear ao longo destes planos principais não sofrerá despolarização ao contrário de qualquer outra polarização. Ao aumentar de tamanho, as gotas perdem a sua forma esférica e gradualmente, tornam-se mais planas na parte inferior desenvolvendo uma concavidade. Esta alteração é devida às forças aerodinâmicas sentidas durante a queda das gotas e ainda devido aos gradientes verticais do vento [28].

A caracterização da despolarização por chuva faz-se habitualmente à custa de diversos parâmetros como, a atenuação por chuva  $A_p$ , a frequência  $f$ , o ângulo de elevação  $\theta$  e o ângulo de polarização  $\tau$ , que no caso da baliza do nosso satélite é  $23^\circ$ .

O método recomendado pelo ITU [20] calcula o XPD (dB) em função da atenuação para o mesmo percurso e probabilidade e é válido para  $8 \leq f \leq 35$  GHz e  $\theta \leq 60^\circ$  onde  $A_p$  é a atenuação excedida durante  $p\%$  do tempo.

$$XPD_{rain} = 30 \log_{10} f - 12.8 f^{0.19} \cdot \log_{10} A_p - 10 \log_{10} [1 - 0.484(1 + \cos 4\tau)] - 40 \log_{10} (\cos \theta) + 0.0052 \sigma^2 \quad \text{Equação 3-7}$$

### 3.3.2 Despolarização devido a gelo

Tanto a despolarização induzida por chuva como a induzida por gelo baseiam-se no mesmo mecanismo, nomeadamente o scattering das partículas [28].

Os cristais de gelo, existentes acima da isotérmica de 0°, podem causar despolarização significativa sem contudo provocar atenuação apreciável uma vez que a parte imaginária do índice de refração do gelo é praticamente nula. Por isto, como a anisotropia deste meio é praticamente imaginária, o diagrama polar de um evento de XPD fica junto ao eixo imaginário fornecendo uma informação importante sobre o meio de propagação [35]. Foi por esta razão, e durante algum tempo, considerado anómalo o fenómeno de despolarização originado nesses cristais de gelo. A figura seguinte apresenta o diagrama polar de um evento de XPD ocorrido em Aveiro no dia 6 de Outubro de 2009 num dia com sucessivos eventos de despolarização, muitos dominados por gelo.

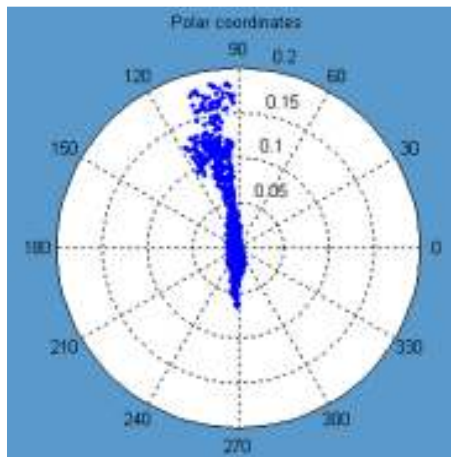


Figura 3-4- Diagrama polar de um evento de XPD

A forma dos cristais varia consoante a temperatura ou a saturação do vapor de água no local onde foram criados [28]. Enquanto que as gotas de chuva despolarizam sobretudo através de atenuação e fase diferencial, as partículas de gelo fazem-no através da fase diferencial, pois o gelo, ao contrário da água não tem grandes perdas.

A contribuição dos cristais de gelo para a despolarização é calculada com a despolarização devido a chuva por um modelo essencialmente empírico:

$$C_{ice} = XPD_{rain} \times (0.3 + 0.1 \log p) / 2 \text{ (dB)} \quad \text{Equação 3-8}$$

O XPD total, para uma percentagem de tempo  $p$ , incluindo os efeitos de gelo é dado por:

$$XPD_p = XPD_{rain} - C_{ice} \text{ (dB)} \quad \text{Equação 3-9}$$

Na figura seguinte encontra-se uma comparação entre o  $XPD_{rain}$  e o  $XPD_p$  em função da atenuação.

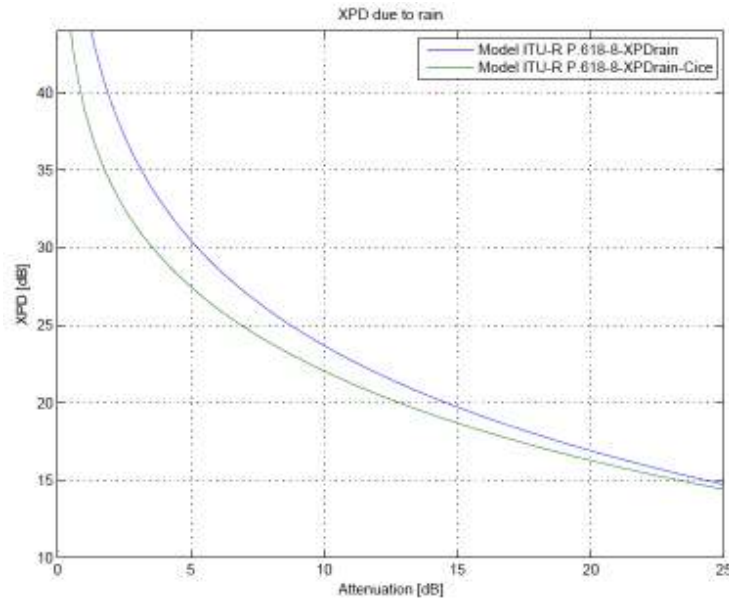


Figura 3-5-XPD só devido a chuva vs XPD com contribuição do gelo

Pela figura anterior é bem visível que a contribuição da despolarização por gelo é mais significativa para atenuações mais baixas. Para atenuações superiores esta é próxima da curva da despolarização por chuva.

Em Aveiro, a passagem de frentes frias causa bastantes eventos de gelo que ocorrem frequentemente antes de fortes chuvadas e em menos casos também depois. Efeitos de gelo e chuva simultâneos são igualmente muitas vezes observados. A figura seguinte apresenta, a título de exemplo, vários eventos de atenuação e despolarização ocorridos durante o dia 6 de Outubro de 2009. Interessante notar que a componente em quadratura do XPD (XPD-Qu-única apresentada aqui) exhibe variações de polaridade típicas de gelo.

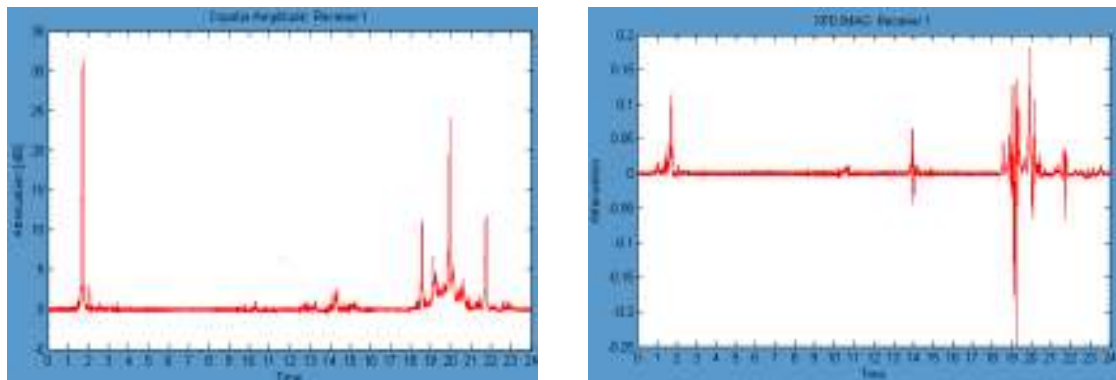


Figura 3-6- Evento de atenuação e correspondente XPD-Qu (6 de Outubro de 2009)

### **3.3.3 Medições noutros locais: uma perspectiva**

Para avaliar os efeitos da chuva sobre os sistemas de comunicação, é essencial conhecer a evolução espacial e temporal da taxa de precipitação.

Diversas campanhas foram realizadas para caracterizar o canal de propagação de forma a melhorar e desenvolver os métodos de previsão, entre as quais se destacam as que usaram os satélites OLYMPUS, ACTS, COMETS, ITALSAT, entre outras [36]. Assim, foram desenvolvidos diversos estudos em várias zonas do mundo permitindo criar uma base global de dados de propagação e meteorológicos que podem ser submetidas ao ITU e, depois de avaliadas, passam a constar de uma base de dados acessível aos investigadores.

Na Polónia foram feitas medições para caracterizar a taxa de precipitação com um tempo de integração de 1 minuto através de 11 anos de dados de chuva fornecidos pelo National Institute of Telecommunications (NIT). Foram ainda analisados dados de previsão de atenuação para várias bandas de frequência [37].

Também em Itália, mais propriamente em Spino d'Adda muito próximo de Milão, foi desenvolvida uma campanha experimental de propagação durante 7 anos. Nesta foram medidas distribuições cumulativas de atenuação, assim como estatísticas condicionadas aos meses e estações do ano e ainda a períodos de 4 horas consecutivas ao longo do dia. Estas estatísticas podem ser úteis para os sistemas de telecomunicações cuja qualidade de serviço tenham que levar em conta as estações do ano ou a variabilidade diária.

Um estudo de comparação de modelos de atenuação por chuva foi feito, com base em medições locais da taxa de precipitação, na Hungria, Alemanha e Espanha [38]. Este estudo permite avaliar a dependência do ângulo de elevação e da frequência nos resultados da atenuação e consequentemente, na implementação das margens de desvanecimento.

Em Praga foram elaboradas estatísticas de intensidade da chuva e comparadas com as medidas em diversos locais de Espanha durante 7 anos. Entre as medidas feitas, encontram-se distribuições cumulativas anuais, mensais e diárias. Esta comparação foi feita pois, de acordo com a antiga versão do ITU-R P.837-3, ambos os locais encontram-se na mesma zona de chuva (zona H) [39]. Também por esta versão da recomendação, Portugal encontra-se nesta zona de chuva, pelo que permite fazer uma análise mais abrangente dos resultados obtidos no nosso país, assim como tirar conclusões com maior fundamento.

## **CAPÍTULO IV**

## 4 Análise da Base de Dados

Explora-se aqui o arranjo experimental que permitiu a recolha dos dados e também se detalham os procedimentos seguidos para os analisar.

### 4.1 Caracterização da experiência

A estação instalada em Aveiro, é composta por um receptor de baliza a 19.701 GHz do satélite HotBird-6 que efectua medições de forma a permitir caracterizar os fenómenos de propagação que afectam as comunicações nesta banda. Procede igualmente à recolha de dados de precipitação. O hardware deste sistema é composto por três sistemas independentes.



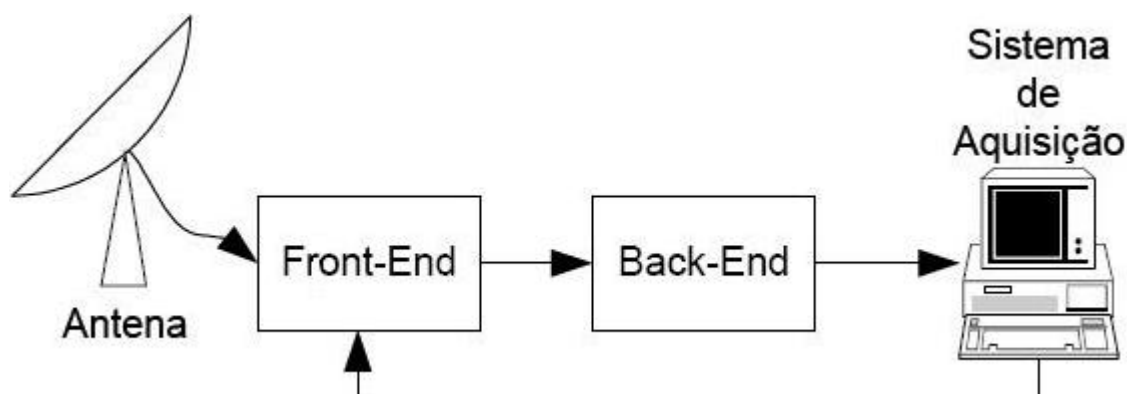
Figura 4-1- Vista da unidade exterior do sistema de recepção

O sistema de recepção implementado é um equipamento muito sensível, constituído por uma unidade exterior (front-end) e uma unidade interior (back-end) e que tem como função medir a amplitude do sinal recebido pela antena.

A parte exterior é formada por uma antena de 1.5m equipada com um alimentador e um transdutor de modos ortogonais (OMT) para polarização linear. A unidade exterior (front-end) possui duas cadeias de conversão, uma para o copolar e outra para o crosspolar, que convertem o sinal para uma FI de 600MHz. O sinal a 600MHz é enviado para uma unidade interior onde será convertido primeiro para 10.7MHz e em seguida colocado a 10.7kHz.

Os dados, depois de recolhidos, são tratados para eliminar ou compensar os erros de medição e ainda para classificar a sua qualidade [40, 41]. Os dados extirpados de erros ou com a sua qualidade avaliada são armazenados, após uma fase denominada pré-processamento, em ficheiros diários.





**Figura 4-2- Diagrama de blocos do sistema de recepção**

A estação meteorológica instalada é composta por dois pluviómetros, um de balde e um conta-gotas, para medir a precipitação, e um abrigo onde se encontra o higrómetro de cabelo e uma PT100 que efectua medições da humidade relativa e temperatura respectivamente.



**Figura 4-3- Vista dos dois pluviómetros e abrigo do Termómetro e do Higrómetro**

Estes equipamentos encontram-se ligados ao sistema de aquisição através de uma carta de protecção a qual, como o próprio nome indica, protege o sistema de situações excepcionais tais como consequências de trovoadas na rede eléctrica.

O sistema de aquisição de dados resume-se a uma carta de aquisição, que recolhe os sinais meteorológicos e os sinais Copolar/ Crosspolar. Esta carta é controlada por um software que permite visualizar os dados em tempo real. Os contadores da carta de aquisição têm como função contar os impulsos dos pluviómetros num intervalo de tempo de 1 minuto.

A aquisição de dados iniciou-se em Março de 2004, mas apenas foram considerados os dados a partir de Setembro desse ano pois só nessa data começou a ser medida a taxa de precipitação. Estão assim disponíveis 5 anos de dados.

Os dados referentes a atenuação e despolarização são adquiridos a uma taxa de 1 amostra por segundo. Foram usados os dados pré-processados e

guardados numa estrutura de directórios organizada por ano e mês de aquisição, que foram a base para o cálculo das estatísticas relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

## 4.2 Desenvolvimento do software e organização dos dados

O tratamento preliminar dos dados envolve uma série de aplicações de software, nomeadamente em C++ e MatLab. A primeira aplicação respeitante ao software da placa de aquisição foi desenvolvida em C++ enquanto que o MatLab serviu para criar aplicações para o tratamento de dados e respectivo processamento estatístico. No âmbito desta tese apenas foi necessário desenvolver o software adicional para proceder ao processamento estatístico.

Todo o processo de desenvolvimento de software envolveu uma cuidada organização da informação devido ao elevado número de dados em questão – dias, meses, anos - para análise que totalizam muitos GBytes. Dessa forma, foi determinante criar um esquema que sintetizasse todo esse percurso.

O organigrama seguinte ilustra a organização do trabalho desenvolvido ao longo desta tese.

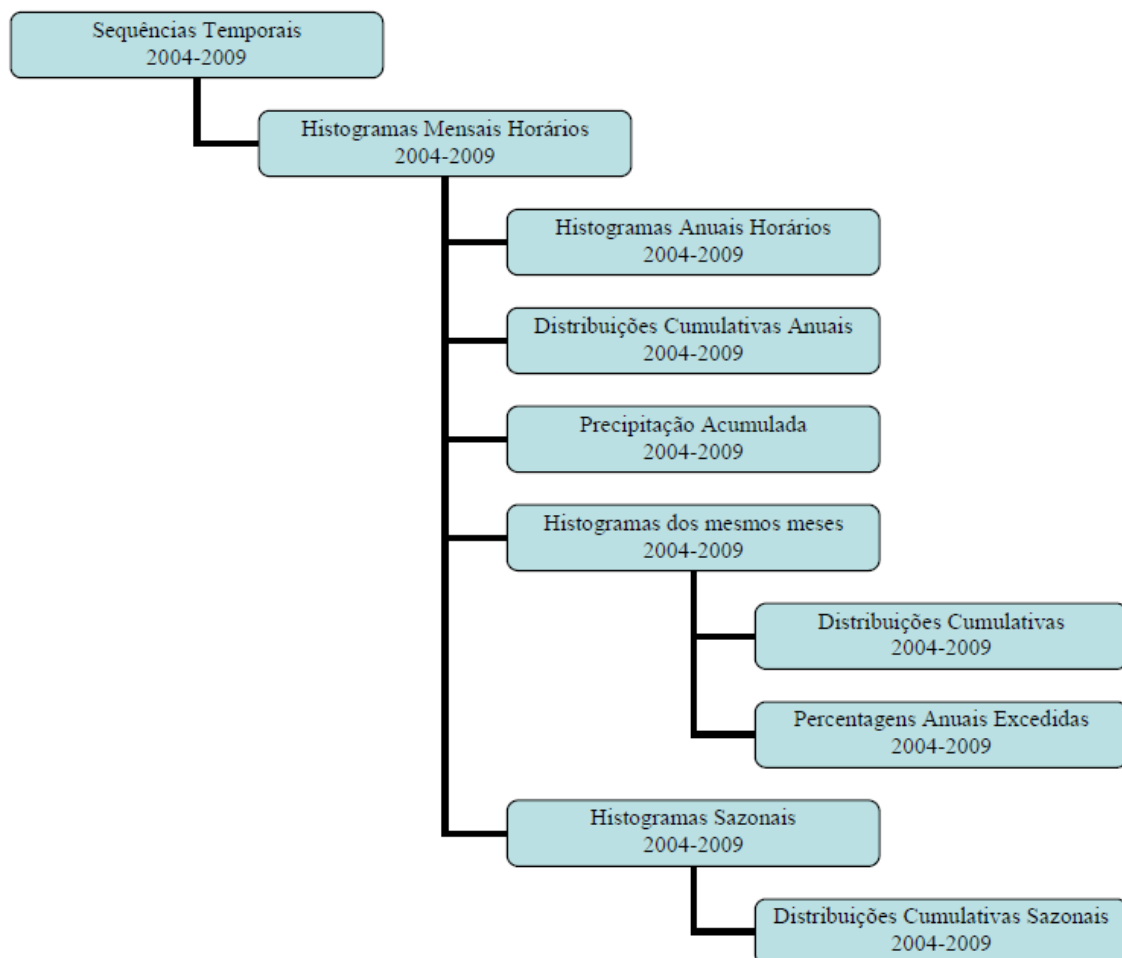


Figura 4-4- Organigrama do trabalho desenvolvido na tese

Os dados pré-processados encontravam-se disponíveis em pastas organizadas por ano e mês de aquisição, como já foi mencionado anteriormente. Cada pasta mensal continha ficheiros diários (yymmddPro.mat), com os dados de atenuação, taxa de precipitação e despolarização retirados com resolução temporal de um segundo. A criação dos histogramas mensais passou pelas seguintes etapas:

- Definição do máximo e mínimo das grandezas e do tamanho do bin;
- Criação das classes: AtenClasses, RainDCClasses e XPDCClasses;
- Criação dos arrays para os histogramas horários;
- Obtenção do array de flags e inutilização dos dados inválidos;
- Cálculo dos histogramas horários e respectiva acumulação mensal (AtenHistMensal, RainDCMensal, XPDHistMensal).

Estes histogramas foram por fim guardados em pastas mensais (yymm).

Obtidos os histogramas mensais horários, procedeu-se à acumulação dos mesmos a fim de criar os histogramas anuais e sazonais, horários e bi-horários, de cada uma das grandezas. Estes histogramas serviram de base para o cálculo das distribuições cumulativas relevantes na análise da variabilidade dos fenómenos de propagação.

Também a partir dos histogramas mensais e anuais, foi possível calcular a precipitação acumulada (mm) mensalmente para cada ano de dados a fim de analisar os meses mais chuvosos, e consequentemente os meses com maior probabilidade de possuírem maior atenuação.

Todos os códigos desenvolvidos, representados pelas células do organograma, possuem estatísticas de atenuação, despolarização e precipitação. Como já foi referido, as pastas anuais têm o seu início em Setembro e fim em Agosto do ano seguinte. O ITU define um ano de dados como aqueles que resultam da recolha ininterrupta de dados, embora com uma margem de indisponibilidade máxima, durante um ano. Isto é: não tem um ano que se iniciar em Janeiro.

As variações diurnas devem ser tomadas em conta na escolha das margens de desvanecimento para serviços regulares que tem que cumprir rigorosos requisitos em termos de qualidade de serviço, ou então, para serviços que podem ser facilmente alocáveis em diferentes intervalos de tempo durante o dia. Por esse facto foram desenvolvidas estatísticas cumulativas horárias e bi-horárias dos fenómenos de propagação e taxa de precipitação, para analisar a sua variabilidade ao longo do dia. De notar que as estatísticas bi-horárias permitem uma análise mais fiável do que as horárias, pois em cada bin, o número de amostras duplica. Por outro lado a execução de estatísticas horárias permite com facilidade obter bi-horárias ou sobre mais horas com facilidade.

Com as estatísticas desenvolvidas para os mesmos meses de cada ano, é possível analisar a variabilidade de um mesmo mês para cada fenómeno de propagação ou meteorológico ao longo dos anos. Para tal acumularam-se os histogramas mensais relativos a cada um dos meses do ano, a fim de obter um histograma final para cada mês. A partir destes, avançou-se para o cálculo das distribuições cumulativas respectivas. Como é óbvio, de ano para ano, um

mesmo mês possui características meteorológicas diferentes. Contudo, num conjunto de vários anos, é possível verificar que existem meses que se destacam em termos de taxa de precipitação e consequentemente atenuação, em relação a outros meses.

Visto que as condições climáticas variam consideravelmente de estação para estação, tornou-se importante analisar a variabilidade sazonal dos fenómenos de propagação. Para facilitar as estações do ano foram definidas da seguinte forma: Outono é composto pelos meses de Outubro, Novembro e Dezembro, o Inverno por Janeiro, Fevereiro e Março, a Primavera é constituída por Abril, Maio e Junho, e por fim o Verão é o conjunto dos meses de Julho, Agosto e Setembro. Inicialmente foram desenvolvidos os histogramas sazonais através da acumulação dos histogramas mensais referentes aos meses de cada estação, como já foi referido, e que serviram de base para calcular as distribuições cumulativas sazonais. Estas foram analisadas anualmente e para o conjunto dos 5 anos de dados, o que permitiu analisar a variabilidade sazonal dos fenómenos em cada ano, bem como a sua variabilidade no conjunto dos 5 anos.

Os principais m-files que foram criados ao longo deste trabalho e de acordo com este organigrama encontram-se descritos no anexo 1.

## **CAPÍTULO V**

## 5 Análise dos resultados

Neste capítulo é feita uma análise dos resultados obtidos ao longo deste trabalho respeitante a alguns dados recolhidos pela estação colocada em Aveiro.

São apresentadas as estatísticas cumulativas anuais, sazonais, mensais, bi-horárias e horárias, a fim de analisar a variabilidade da precipitação e da atenuação comparando-a com os modelos existentes e com as mesmas estatísticas recolhidas noutros locais.

### 5.1 Atenuação e Taxa de Precipitação

#### 5.1.1 Precipitação acumulada

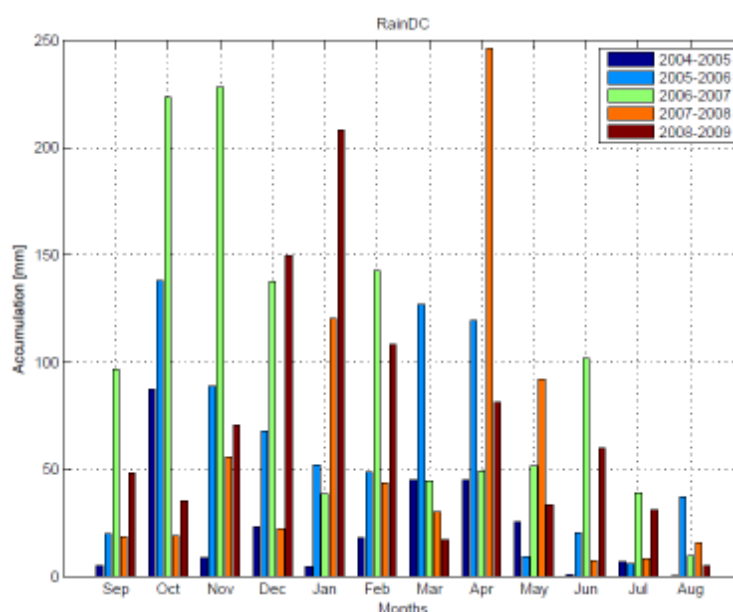


Figura 5-1- Gráfico da Precipitação Acumulada

A figura anterior apresenta a precipitação mensal acumulada para cada um dos 5 anos de dados. É claramente notório que o mês com maior acumulação de precipitação foi Abril de 2008, seguindo-se os meses de Novembro e Outubro de 2006 e Janeiro de 2009. Já os meses de Novembro de 2004 e Junho e Agosto de 2005 foram os que apresentaram menor acumulação de precipitação.

Na tabela seguinte é feita uma comparação da precipitação acumulada para os anos 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008 e 2008-2009 com a média da mesma para o conjunto dos 5 anos. É ainda feita uma comparação com os valores das normais climatológicas de referência, que são valores médios de precipitação acumulada baseados em medições feitas em 54 estações meteorológicas do Continente, correspondentes a um período de 30 anos, entre 1971 e 2000 e que se encontram disponíveis no site do Instituto de Meteorologia de Portugal [42].

**Tabela 2- Comparação dos valores de Precipitação Acumulada medidos com as Normais Climatológicas**

Meses do Ano	Ano					Média	
	04-05 (mm)	05-06 (mm)	06-07 (mm)	07-08 (mm)	08-09 (mm)	04-09 (mm)	71-00 (mm)
<b>Setembro</b>	—	20.2	96.7	18.7	48.2	37.8	42.1
<b>Outubro</b>	87.23	137.8	223.4	18.8	35.5	100.5	98.2
<b>Novembro</b>	8.9	88.9	228	55.6	70.6	90.4	109.4
<b>Dezembro</b>	23.2	67.7	137.5	22	149.4	80	144
<b>Janeiro</b>	4.4	52.1	38.4	120.4	208.3	84.7	117.3
<b>Fevereiro</b>	17.8	48.7	142.7	43.9	108.3	72.3	100.1
<b>Março</b>	45.1	126.8	44.6	30.3	17.2	52.8	61.2
<b>Abril</b>	45.1	119.2	49.3	246.2	81.1	108.2	78.9
<b>Maió</b>	25.6	9.3	51.7	92.1	33.6	42.5	71.2
<b>Junho</b>	0.8	20.3	101.9	7.3	60.1	38	32.2
<b>Julho</b>	7	6.1	39	8.5	31	18.3	13.8
<b>Agosto</b>	0.6	37.2	9.8	15.7	5.1	13.7	13.7
<b>Total Anual</b>	265.7	734.3	1163	679.5	848.4	739.2	882.1

Em geral os valores registados para o conjunto dos 5 anos de dados são similares à média histórica de referência. A precipitação acumulada total em 2006-2007 é superior à de referência, devido sobretudo aos meses de Outubro e Novembro que foram especialmente chuvosos.

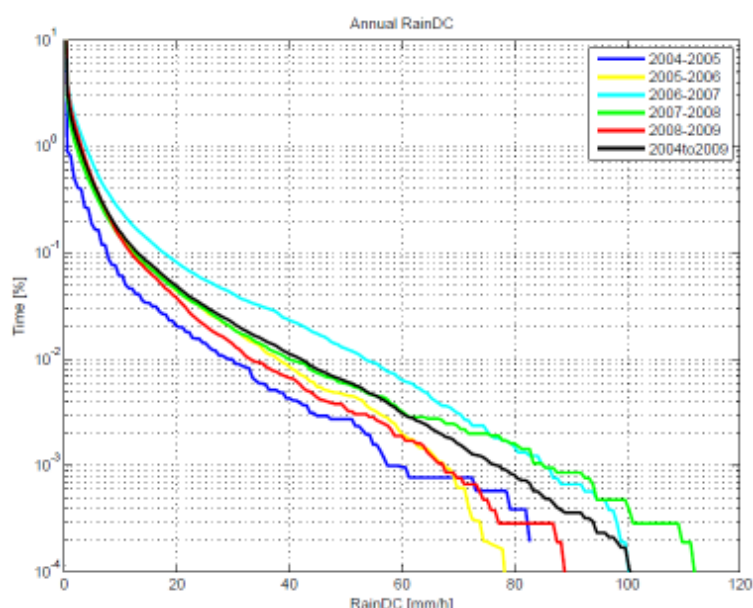
Já o ano de 2004-2005 foi extremamente seco, possuindo valores de precipitação muito inferiores aos valores médios. Este ano registou o valor mais baixo do total de precipitação desde 1931 [43].

Por esta análise é de esperar que o ano 2006-2007 seja o ano com maior atenuação.

### **5.1.2 Precipitação: Análise Anual**

As distribuições da precipitação são necessárias para usar em diversos modelos de previsão da atenuação por chuva. A chuva caracteriza-se por uma grande variabilidade anual, pelo que os resultados podem variar substancialmente de um ano para o outro. Por isso é necessário um elevado número de anos para criar uma base de dados de precipitação fiável.

Nesta secção é efectuada uma análise anual das distribuições da taxa de precipitação ao longo dos 5 anos de dados e comparada com os modelos do ITU.



**Figura 5-2- Gráfico Anual da Taxa de Precipitação**

Na figura anterior encontra-se ilustrada a precipitação anual desde 2004 até 2009. A curva a preto apresenta a mesma para o período dos 5 anos.

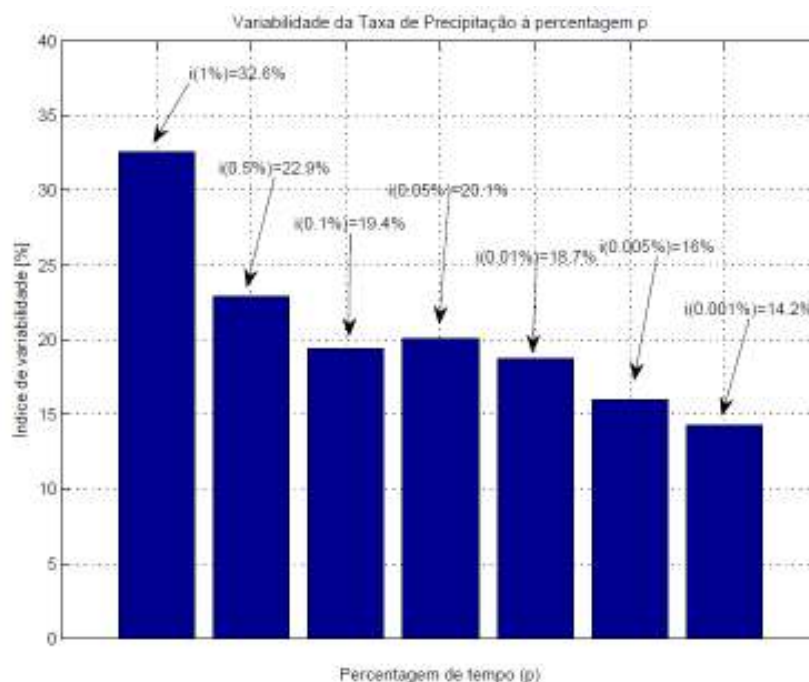
Pela análise da figura verifica-se que 2004-2005 foi o ano mais seco, enquanto que 2006-2007 foi o ano em que os eventos de precipitação se fizeram sentir com maior intensidade. É francamente evidente a variabilidade anual da precipitação: a taxa de precipitação excedida para 0.1% do tempo varia entre 7.6 mm/h (em 2004-2005) e 17.7 mm/h (em 2006-2007), enquanto que a taxa de precipitação excedida para 0.01% do tempo varia entre 29.2 mm/h (em 2004-2005) e 53.4 mm/h (em 2006-2007).

Considerando  $i_{Ry2y}(p\%)$  o índice de variabilidade anual da taxa de precipitação à percentagem  $p$  com

$$i_{Ry2y}(p\%) = \frac{100}{5} \sum_{y=2004}^{2009} \frac{|R_y(p\%) - R_5(p\%)|}{R_5(p\%)} (\%) \quad \text{Equação 5-1}$$

onde  $R_{y2y}(p\%)$  é a intensidade da taxa de precipitação a  $p\%$  para o ano genérico  $y$ , e  $R_5(p\%)$  é a intensidade da taxa de precipitação média dos 5 anos a  $p\%$  [36]. O  $i_{Ry2y}(p\%)$  calculado para 0.1% e 0.01% do tempo é igual a 19.4% e a 18.7%, respectivamente. A figura seguinte apresenta o índice de variabilidade anual da taxa de precipitação à percentagem  $p$ . De notar que para 0.05% do ano, a variabilidade é superior à verificada para 0.1% do tempo. Este facto pode ser justificado pela presença de trovoadas, cuja variabilidade é superior à da chuva estratiforme presente no resto do tempo.





**Figura 5-3- Gráfico do Índice de variabilidade da Taxa de Precipitação a p%**

Visto que 2006-2007 foi o ano que apresentou mais precipitação, é de esperar que este seja o ano de maior atenuação.

A tabela seguinte apresenta os valores das distribuições de precipitação, ilustradas na figura anterior, para um conjunto de percentagens de tempo.

**Tabela 3- Comparação dos valores de Taxa de Precipitação com os Modelos ITU**

Tempo (%)	Anos					Média 04-09 (mm/h)	ITU	
	04-05 (mm/h)	05-06 (mm/h)	06-07 (mm/h)	07-08 (mm/h)	08-09 (mm/h)		837-4 (mm/h)	837-5 (mm/h)
1	0.5	2.5	3.8	2.1	3	2.7	2.4	2.6
0.5	1.8	4.5	6.3	4.2	4.9	4.8	3.9	4.5
0.1	7.6	12.4	17.7	12.3	11.8	13	11.3	14.3
0.05	10.9	18.8	26.7	18.7	17.4	19.6	17.9	22.7
0.01	29.2	38	53.4	39.9	33	42	45.6	51.7
0.005	37.9	47.1	63.7	53.3	43.3	53.6	61.7	66.5
0.001	57.4	67.5	85	85	67.3	77	103.1	102.6

Como é possível observar, para percentagens de tempo acima dos 0.01%, existe consonância entre os dados medidos para a média dos 5 anos e os dados dos modelos ITU-R P.837-4 e P.837-5. Para precipitações acima dos 42 mm/h verifica-se uma crescente divergência entre estes.

Apesar da taxa de precipitação medida ser por vezes melhor descrita por um dos modelos e noutros casos pelo outro, no geral é o modelo ITU-R P.837-4 que parece estar mais próximo desta.

### 5.1.3 Atenuação: Análise Anual

Como já foi referido anteriormente, de entre os fenómenos que afectam os sistemas de telecomunicações, a atenuação é o mais relevante. As campanhas experimentais visam, essencialmente, obter dados concorrentes de propagação e meteorológicos a fim de desenvolver e validar modelos que permitam caracterizar os fenómenos de propagação. As técnicas de combate aos mesmos e avaliação da sua eficácia baseiam-se nestes mesmos dados ou dados simulados com as mesmas características.

A análise efectuada em seguida caracteriza a distribuição da atenuação anualmente, desde 2004 até 2009 e para o mesmo período de 5 anos, em termos da sua variabilidade, comparando os resultados com os dados fornecidos pelo ITU e com outros locais.

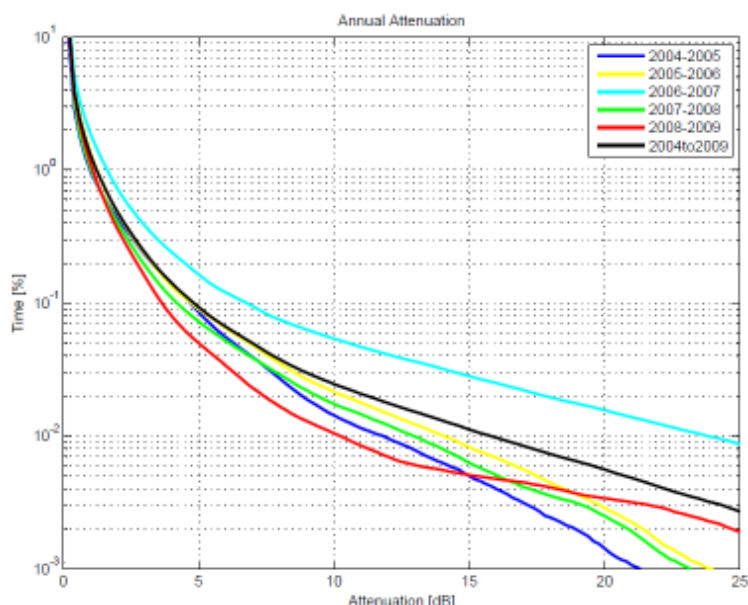


Figura 5-4- Gráfico Anual de Atenuação

Na figura anterior encontra-se ilustrada a distribuição cumulativa anual da atenuação de 2004 a 2009, bem como para o período dos 5 anos (curva a preto).

Como é possível verificar, o ano com maior atenuação foi o ano de 2006-2007. É de notar que este deve ter sido um ano com eventos excepcionais de precipitação, pois a atenuação é bastante mais elevada quando comparada com os outros 4 anos de dados. Realmente ao verificar os resultados anteriores referentes à taxa de precipitação, verifica-se que 2006-2007 foi bastante mais chuvoso que os restantes anos. Também para a atenuação é importante analisar a variabilidade anual. Considerando  $i_{Ay2y}(p\%)$  o índice de variabilidade anual da Atenuação à percentagem  $p$  com

$$i_{Ay2y}(p\%) = \frac{100}{5} \sum_{y=2004}^{2009} \frac{|A_y(p\%) - A_5(p\%)|}{A_5(p\%)} (\%) \quad \text{Equação 5-2}$$

onde  $A_{y2y}(p\%)$  é a atenuação a  $p\%$  para o ano genérico  $y$ , e  $A_5(p\%)$  é a atenuação média dos 5 anos a  $p\%$  [36]. O  $i_{Ay2y}(p\%)$  calculado para 0.1% e 0.01% do tempo é igual a 17.08% e a 27.7%, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com os obtidos para a taxa de precipitação se considerarmos que a atenuação também se deve à contribuição, embora menor, de outros factores como as nuvens e os gases. A figura seguinte apresenta o índice de variabilidade anual da atenuação à percentagem  $p$

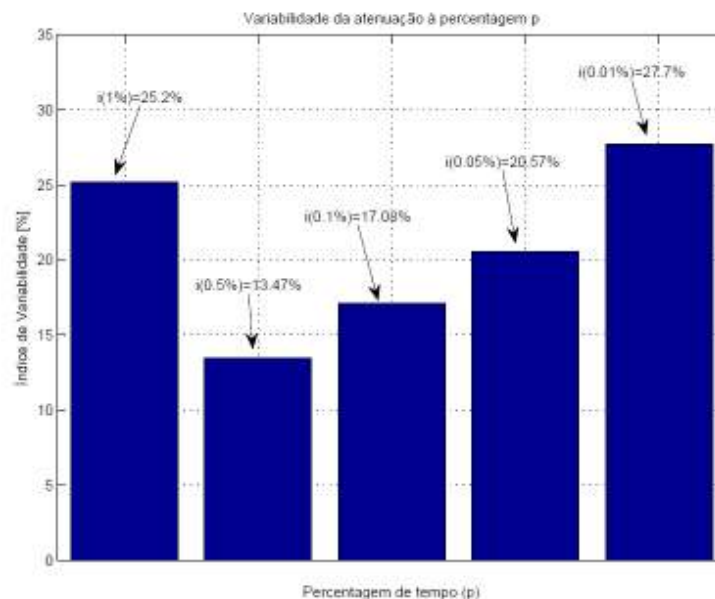


Figura 5-5- Gráfico do Índice de variabilidade da Atenuação a  $p\%$

A tabela seguinte detalha os resultados da variabilidade da atenuação para algumas percentagens de tempo, fazendo ainda uma comparação com os dados fornecidos pelo ITU.

Tabela 4- Comparação dos valores de Atenuação com os Modelos ITU

Tempo (%)	Anos					Média 04-09 (dB)	ITU-R P.618-8 com	
	04-05 (dB)	05-06 (dB)	06-07 (dB)	07-08 (dB)	08-09 (dB)		837-4 (dB)	837-5 (dB)
1	0.98	1.2	1.6	1	1.9	1.23	1.5	1.7
0.5	1.8	1.9	2.55	1.74	1.67	1.96	2.4	2.7
0.1	4.7	4.7	6.8	4.2	3.5	4.8	6.1	6.7
0.05	6.3	6.9	10.5	6.1	5	7	8.6	9.5
0.01	12	14.1	23.8	13	10.2	15.8	17.2	18.7
0.005	15	17.5	—	16.1	15.2	20.8	22	23.9

Em geral, os resultados experimentais de atenuação encontram-se em concordância com os dados fornecidos pelo modelo ITU-R P.618.8. Mais uma vez verifica-se que o modelo ITU-R P.837-5 apresenta valores em excesso relativamente aos dados medidos, assim como acontecia para a precipitação. Já o modelo ITU-R P.837-4, mais antigo, apresenta valores mais próximos dos recolhidos. Pela tabela 4 é também possível analisar quais as margens de desvanecimento a ser implementadas como função de disponibilidade nos vários anos.

Averiguar a sua variabilidade anual é bastante importante, por exemplo, para 99.99% de disponibilidade a margem de desvanecimento varia entre os 10.2 e os 23.8 dB. Já para o conjunto dos 5 anos, são necessários 15.8 dB. De notar que, apesar de 4.8 dB assegurarem 99.9% de disponibilidade média para os 5 anos, esta margem apenas assegura 99.82% de disponibilidade em 2006-2007. Assim, os 4.8 dB de margem levariam a 15.8 horas de quebra da ligação em vez das 8.8 horas supostas, isto é, aproximadamente mais 79% do que o esperado. Para disponibilidades mais baixas, estas diferenças anuais vão diminuir, como é esperado devido à limitada variabilidade anual dos componentes da atenuação, sem ser a chuva. Existem estudos disponíveis mostrando que para estes valores de disponibilidade a redistribuição da potência do satélite de alguns dBs, consoante as necessidades estimadas desejavelmente em tempo real, providencia um significativo incremento de clientes servidos.

A fim de efectuar uma comparação dos nossos resultados de atenuação com os mesmos obtidos noutros locais, contabilizando a dependência da atenuação com a frequência e com o ângulo de elevação, utilizaram-se os valores da atenuação excedida para 0.01% do tempo, obtidos na Polónia, Hungria, Alemanha, Espanha e Itália. As figuras presentes no anexo II ilustram os resultados obtidos nestes locais [36-38].

Na tabela 5, encontram-se os valores da atenuação excedida para 0.01% do tempo, calculada através do modelo ITU.

Dos resultados obtidos em Budapeste é claramente notório que a atenuação atinge valores superiores na banda Ka e, com o satélite HispaSat, que possui menor ângulo de elevação que o HotBird (18.6° e 35.42°, respectivamente). Já os nossos resultados de atenuação ficam aquém dos obtidos para a banda Ka, pois para além do ângulo de elevação do nosso satélite ser superior (38°), a nossa frequência (19.7GHz) é um pouco inferior [38].

Na Alemanha, mais propriamente em Józsa e Oberpfaffenhofen, a atenuação obtida com o satélite PanamSat é superior à do HotBird, facto que se deve à grande diferença entre os ângulos de elevação dos dois satélites (8.7° e 35.42°, respectivamente). Os nossos resultados de atenuação são superiores aos obtidos em Oberpfaffenhofen, facto que se deve à superior frequência a que o nosso satélite opera e à superior taxa de precipitação que Aveiro possui relativamente a este local [38].

Relativamente às estatísticas obtidas em Espanha com os satélites HispaSat e PanamSat, é de notar que os valores de atenuação registados foram inferiores aos nossos. Isto ocorre, pois a banda de frequências destes

satélites é a Ku, e a taxa de precipitação excedida para 0.01% do tempo foi inferior à nossa [38].

Em Spino d'Adda, os resultados de atenuação foram parecidos com os nossos, embora um pouco superiores. Como a frequência (18.7 GHz) e o ângulo de elevação (37.7°) são semelhantes aos nossos, é de concluir que a maior causa da atenuação em Spino d'Adda ser superior à nossa foi a precipitação que atingiu os 50 mm/h para 0.01% do tempo [36].

Na Polónia, os valores de atenuação obtidos foram bem superiores aos nossos, sobretudo para pequenas percentagens de tempo. Apesar de a frequência (18.6GHz) e o ângulo de elevação (22°) serem inferiores aos nossos, não causariam tal discrepância na atenuação. O facto de terem ocorrido tempestades durante as experiências é a causa mais provável para este valor em excesso.

**Tabela 5- Atenuações obtidas nos locais a comparar**

<b>Locais</b>	<b>HotBird Ku/Ka</b>	<b>HispaSat</b>	<b>PanamSat</b>	<b>ItalSat</b>	<b>Lucz I</b>
Budapeste	12dB/27.7dB	17dB	—	—	—
Józsa	14dB	—	21dB	—	—
Oberpfaffen	8dB	—	12.5dB	—	—
La Coruña	—	12.8dB	11.5dB	—	—
Santiago	—	12.1dB	11dB	—	—
Vigo	—	14dB	12.8dB	—	—
Spino d'Adda	—	—	—	14.4dB	—
Polónia	—	—	—	—	25dB

Com o intuito de avaliar, com maior precisão, a dependência da frequência na atenuação, o ITU propõe uma recomendação que permite escalonar a atenuação de acordo com este parâmetro. A Equação 5-3 calcula directamente a atenuação em função da frequência e da atenuação já conhecida.

$$A_2 = A_1 (\varphi_2 / \varphi_1)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)}$$

**Equação 5-3**

Onde:

$$\varphi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2}$$

**Equação 5-4**

e,

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3} (\varphi_2 / \varphi_1)^{0.5} (\varphi_1 A_1)^{0.55}$$

**Equação 5-5**

$A_1$  e  $A_2$  são os valores equiprováveis do excesso de atenuação por chuva às frequências  $f_1$  e  $f_2$  respectivamente.

Para calcular o escalonamento, foi necessário primeiramente conhecer a dependência do ângulo de elevação na atenuação para as nossas coordenadas. Para tal recorreu-se ao modelo ITU-R P.618-8 e substituiu-se o valor do nosso ângulo de elevação pelo utilizado nos diferentes locais a comparar e obteve-se a nova atenuação  $A_1$  para a nossa frequência (19.7GHz). É agora possível prosseguir para o cálculo do escalonamento da atenuação em função da frequência para obter a nova atenuação  $A_2$ .

Na tabela seguinte encontram-se representados os resultados do escalonamento de atenuação para cada uma das frequências dos satélites usados em cada um dos locais mencionados anteriormente.

**Tabela 6- Escalonamento da Atenuação com base na frequência**

Satélites	$\theta$ (°)	$A_1$ (dB)	$f$ (GHz)	$A_2$ (dB)
ItalSat	37.7	17.57	18.7	16.10
Lucz	22	22.44	18.6	20.42
HotBird Ku	35.42	17.99	12.539	8.08
HotBird Ka	35.42	17.99	19.842	18.21
HispaSat	18.06	24.89	12.662	11.57
PanamSat	8.7	37.51	11.510	14.99

Comparando os resultados da tabela anterior com os nossos ( $A_{0.01}=17.52\text{dB}$  para  $f=19.7\text{GHz}$  e  $\theta=38^\circ$ ), confirma-se a análise feita anteriormente, referente à dependência da frequência e do ângulo de elevação na atenuação, isto é, à medida que a frequência aumenta e o ângulo de elevação diminui, resulta numa maior atenuação do sinal.

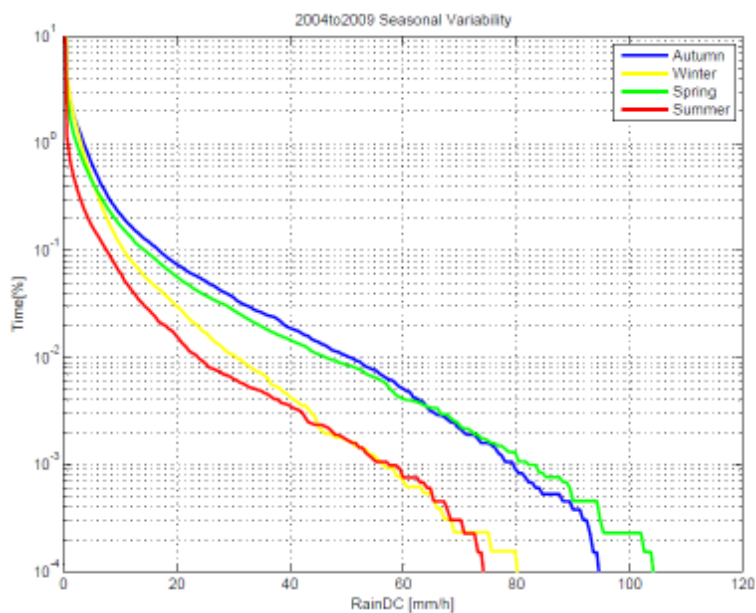
#### 5.1.4 Análise Sazonal

As condições climáticas variam bem mais de estação para estação do que de ano para ano, pois Aveiro possui um clima temperado mediterrânico com características marítimas, onde a maior parte das chuvas cai entre os meses de Outubro e Maio [44].

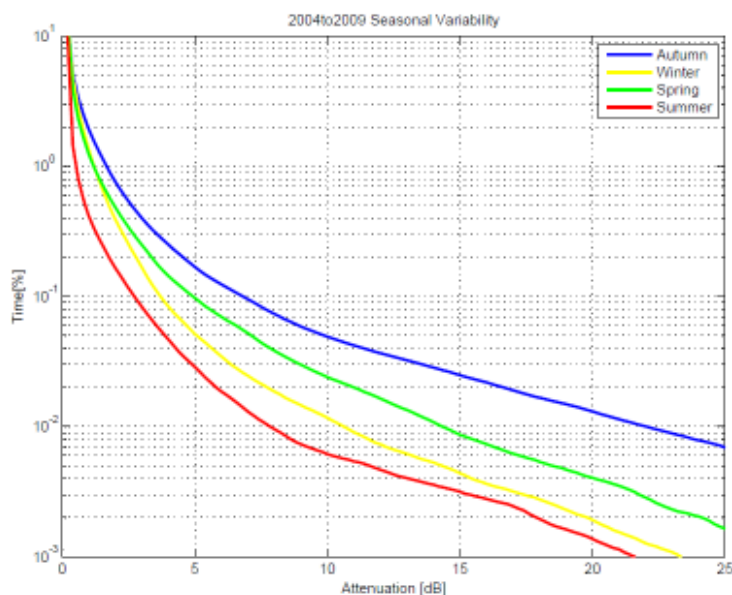
Nesta secção são analisadas as estatísticas sazonais de precipitação e atenuação desde 2004 até 2009.

Nas figuras 5.6 e 5.7 estão presentes as distribuições cumulativas sazonais da precipitação e da atenuação, para o período dos 5 anos de dados. De notar que o Outono consiste nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro, o Inverno consiste nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março, a Primavera

consiste nos meses de Abril, Maio e Junho e, o Verão consiste nos meses de Julho, Agosto e Setembro.



**Figura 5-6- Gráfico da Variação Sazonal da Taxa de Precipitação**



**Figura 5-7- Gráfico da Variação Sazonal da Atenuação**

Verifica-se que o Verão é a estação com o menor valor de atenuação, enquanto que é no Outono que a atenuação se faz mais sentir. De notar que na Primavera os valores de atenuação recolhidos são próximos da média entre 2004 e 2009. Este comportamento verifica-se para os anos individuais, como é mostrado nas tabelas seguintes. Nestas, confirma-se que o Verão é a estação mais seca em todos os anos de 2004 até 2009. As estações mais chuvosas foram a Primavera em 2007-2008 e o Outono nos restantes anos.

Também em Spino d'Adda foram realizadas as estatísticas sazonais, onde se verificou que realmente é na estação mais chuvosa que a atenuação toma

valores superiores, sendo necessário implementar maiores margens para desvanecimento.

Em termos de margens de desvanecimento a ser implementadas, é evidente que, no Outono uma disponibilidade superior a 99.95% é difícil de atingir, requerendo margens superiores a 20 dB. Já no Verão e no Inverno, as margens a atingir são bem mais acessíveis para a mesma disponibilidade.

De notar que no Verão, uma disponibilidade de 99.9% é atingida implementando uma margem de 2.7 dB, enquanto que esta mesma margem apenas garante 99.52% de disponibilidade para o Outono. Ou seja, esta margem conduziria a uma quebra na ligação durante 42 horas, aproximadamente mais 377% do que o esperado (8,8 horas). Portanto o Inverno, suposta pelo senso comum, como uma estação chuvosa não o é de facto. O Outono e a Primavera contribuem, ambas, mais para a taxa de precipitação e atenuação.

**Tabela 7- Valores de variabilidade sazonal da Taxa de Precipitação e da Atenuação**

		Precipitação (mm/h)					Atenuação (dB)				
Ano	Estação	Tempo (%)									
		1	0.5	0.1	0.05	0.01	1	0.5	0.1	0.05	0.01
04-05	Outono	1.5	3.5	10.4	16.4	33.4	1.6	3	6	8	15
	Inverno	1	2	5	8	23	0.7	1	2	3	9
	Primavera	0.9	2	7	11	23	0.7	3	3	4	9
	Verão	0.4	0.5	2	3.5	9.5	0.4	0.6	2	3	6
05-06	Outono	3.7	6	16	23	39	1.7	3	7	9	17
	Inverno	3.4	5.3	12	18	30	1.4	2	4	5	11
	Primavera	1.6	3.6	12	23	50	1	5	5	7	14
	Verão	0.5	1.3	7.5	12	29	0.5	1	3	4	10
06-07	Outono	6.6	11	35	47	70	3	5	15	21	-
	Inverno	3.3	5	10	13	26	1.3	2	4	5	9
	Primavera	3	5	14	18	31	1.4	5	5	7	13
	Verão	2	4	12	18	42	0.8	1	4	6	15
07-08	Outono	1	3	7	9	18	0.8	2	3	4	8
	Inverno	3	5	12	17	30	1.2	2	4	6	13
	Primavera	4	8	23	35	64	1.7	7	7	10	19
	Verão	0.5	1	6	9	17	0.4	0.6	2	3	5
08-09	Outono	4	6	13	19	30	1	2	4	5	11
	Inverno	4	6	14	20	38	1.4	2	4	5	10
	Primavera	2	4	12	19	50	1	4	4	6	18
	Verão	1	3	9	12	21	0.6	1	2.5	3	5



### 5.1.5 Análise mensal e diurna

A distribuição acumulada da atenuação não se distribui por igual ao longo do dia e do ano. É altamente provável que determinadas horas do dia ou determinados meses sofram uma atenuação superior ao resto. Para alguns sistemas de comunicações por satélite pode ser de grande interesse o estudo da variabilidade diurna e mensal. Isto porque existem serviços fixos que têm de preencher requisitos a nível da qualidade de serviço, ou pelo contrário, para serviços que podem facilmente ser atribuídos a diferentes horas do dia.

Deve-se ter em atenção que não é possível um estudo rigoroso da variabilidade com um período de medidas tão curto. Seriam necessários mais anos de medidas para obter conclusões precisas. No entanto, é possível extrair algumas tendências gerais do comportamento da atenuação.

Para estudar a variabilidade mensal, optou-se por comparar a atenuação respectiva a um conjunto de percentagens de tempo, com a precipitação nas mesmas condições. As figuras 5.8 e 5.9 representam a variabilidade mensal da atenuação e da precipitação para o período dos 5 anos de dados.

Da figura 5.8 verifica-se que a variabilidade mensal da chuva é bastante elevada. Para a percentagem mais pequena 0.03%, a taxa de precipitação oscila entre os 12.6 mm/h no mês de Agosto e, os 40.8 mm/h no mês de Outubro. Em geral é claramente notório que os meses em que mais choveu entre 2004 e 2009 foram Outubro e Abril, sendo os meses mais secos Agosto e Julho.

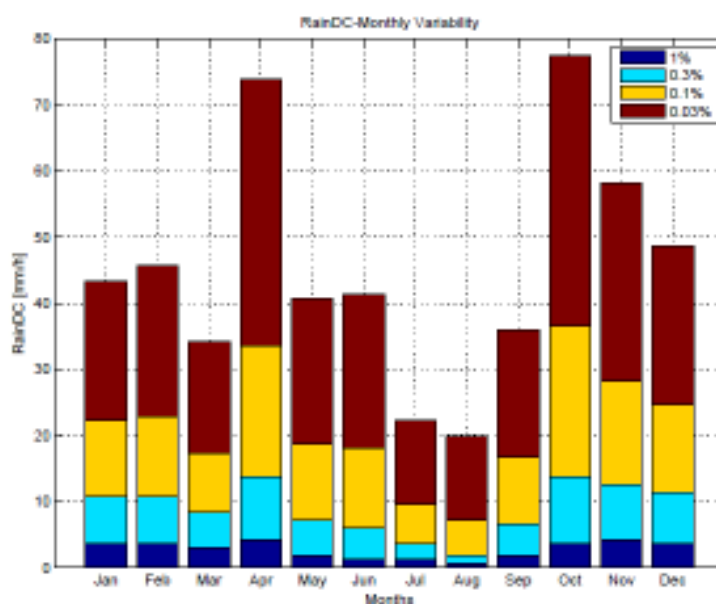


Figura 5-8- Variabilidade mensal da Taxa de Precipitação

Pela figura 5.9, verifica-se que a variabilidade da atenuação também é elevada. Em geral existe uma grande similaridade entre o comportamento mensal da atenuação e o da precipitação. O mês de Outubro é o que maior atenuação possui, como era de esperar pelos elevados valores de precipitação registados neste mês.

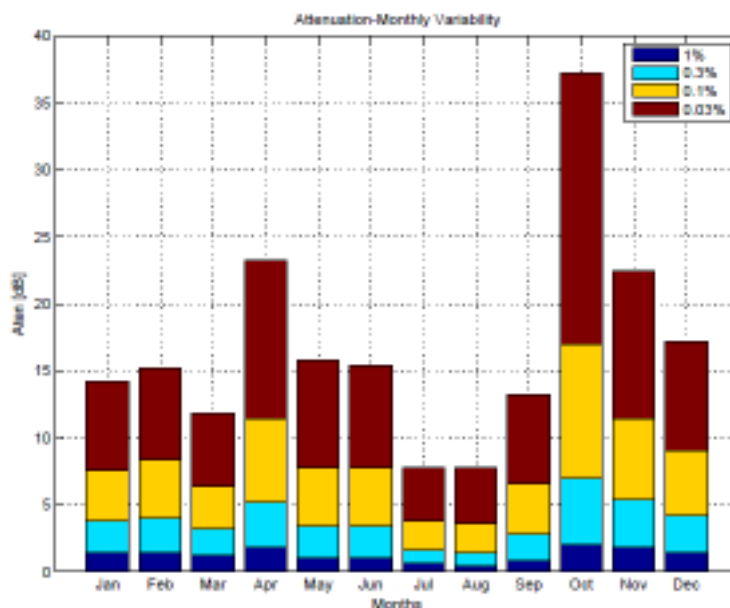


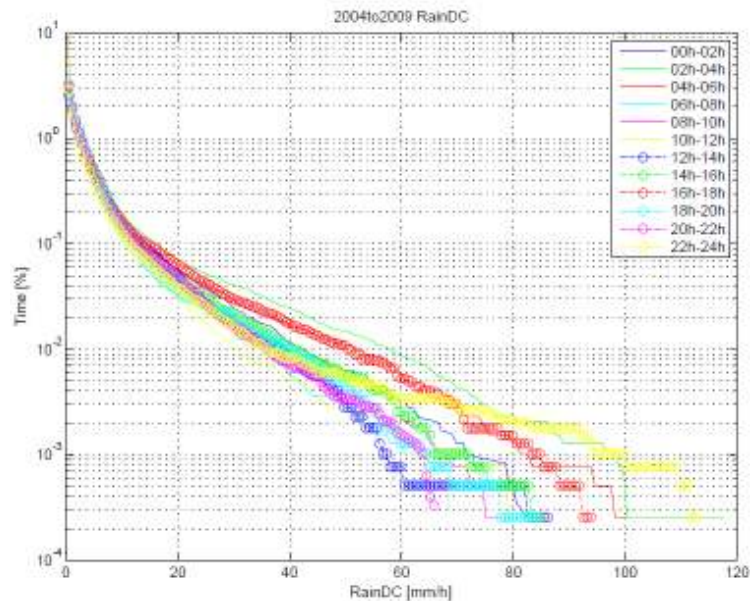
Figura 5-9- Variabilidade mensal da Atenuação

Em média o mês mais seco é Agosto e o mais chuvoso é Outubro. Este comportamento não é sempre confirmado em cada ano como é possível verificar pela tabela seguinte. Nos anos 2005-2006 e 2007-2008, Maio e Julho foram meses mais secos que Agosto, respectivamente, enquanto que em 2007-2008 Abril foi mais chuvoso que Outubro.

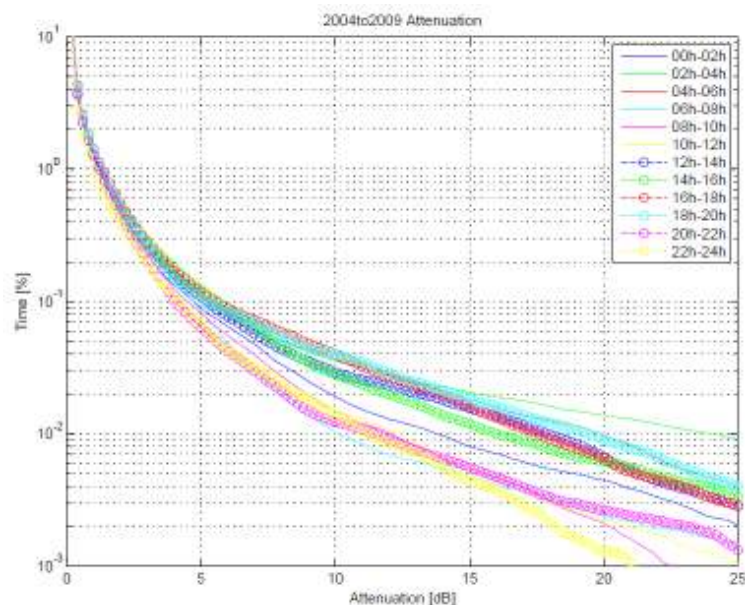
Tabela 8- Anos com maior e menor Atenuação

Percentagem de tempo (%)	Menor Atenuação (dB)				Maior Atenuação (dB)	
	2005-2006		2007-2008		2005-2006	
	Maio	Agosto	Julho	Agosto	Abril	Outubro
10	0.18	0.19	0.2	0.21	0.38	0.18
1	0.38	0.58	0.38	0.44	2.9	0.44
0.5	0.5	1.4	0.46	0.68	4.3	0.82
0.1	1.3	4.9	0.75	1.92	11.74	2.16
0.05	1.9	7.8	0.91	2.6	15.7	2.68
0.01	3.6	18.1	1.27	3.8	23	3.6
0.005	5.4	21.8	1.42	4.48	—	3.7
0.001	7.3	25	—	5.4	—	4

Para o estudo da variabilidade diária escolheram-se intervalos de 2 horas: 00h-02h, 02h-04h, 04h-06h, 06h-08h, 08h-10h, 10h-12h, 12h-14h, 14h-16h, 16h-18h, 18h-20h, 20h-22h e 22h-24h. Nas figuras 5.10 e 5.11 encontram-se representados os resultados da precipitação e da atenuação, respectivamente.



**Figura 5-10- Variabilidade diurna da Taxa de Precipitação**



**Figura 5-11- Variabilidade diurna da Atenuação**

Em ambos os casos é notório que a variabilidade diurna é muito menor que a variabilidade mensal, ou mesmo sazonal. É de notar que a precipitação se faz sentir durante o dia de forma semelhante, embora em média, seja entre as 2h e as 4h e entre as 16h e as 18h que esta é mais intensa. Este comportamento não se confirma anualmente pois, devido à variabilidade que se verifica de um ano para o outro, o mesmo intervalo de tempo pode ser o mais seco num ano e o mais chuvoso no outro.

Esta variação verificou-se igualmente pouco conclusiva em Spino d'Adda [36] pelo que as estatísticas diurnas eram muito semelhantes. Para tal, recorreram à análise do mês mais chuvoso para obter resultados mais significativos.

De forma análoga, analisou-se a variabilidade bi-horária do mês mais chuvoso dos 5 anos, o mês de Outubro, representada na figura 5.12. É possível verificar que é durante a tarde que ocorrem atenuações mais fortes, sobretudo entre as 12h e as 20h, coincidindo este intervalo de tempo com o mesmo em que as chuvas foram mais intensas.

Assumindo um sistema de radiodifusão televisiva por satélite com horário nobre entre as 20h e as 22h, e uma disponibilidade de link de 99.9%, sem contar com as variações diárias, é necessário implementar uma margem média de 4.8 dB (ver Tabela 4). O projecto de sistemas baseados em horário nobre não trará vantagem, requerendo uma margem de 4 dB.

Por outro lado, ao analisar o mês mais chuvoso, o mesmo sistema deverá requerer uma margem diária média de 10.5 dB e uma margem para o horário nobre de 3.3 dB, obtendo aqui um importante ganho de 7.2 dB. Neste caso, uma disponibilidade diária média de 99.5% é garantida.

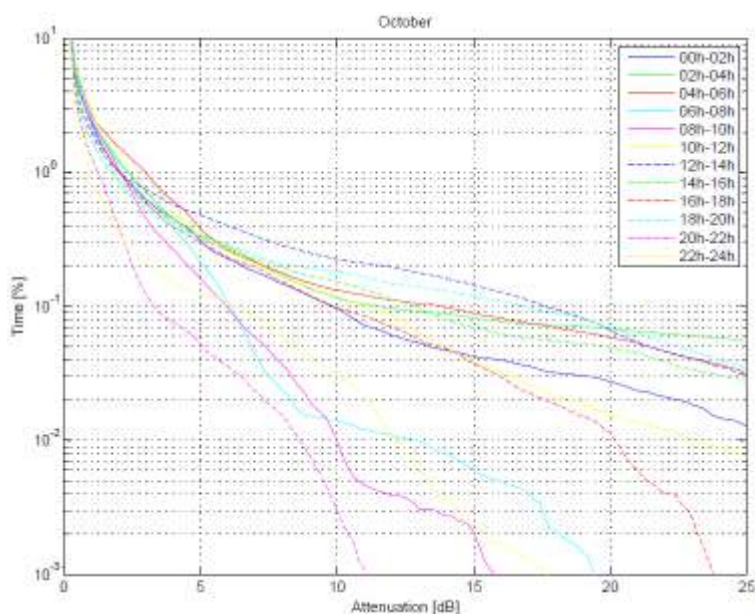


Figura 5-12- Variabilidade diurna da Atenuação para o mês mais chuvoso

## 5.2 Discriminação da Polarização Cruzada - XPD

Na banda Ka, a despolarização tem como causa principal o gelo e a chuva devido a estes hidrometeoros não serem esféricos e assumirem uma orientação preferencial resultante de efeitos aerodinâmicos e campos eléctricos (como é o caso do gelo).

A despolarização por chuva torna-se significativa apenas para níveis de atenuação acima dos 10 dB. Por outro lado, a despolarização por gelo pode ocorrer sem que haja atenuação significativa. A despolarização por chuva e por gelo pode ser prevista usando técnicas empíricas como as recomendadas pelo ITU (ver subcapítulos 3.3.1 e 3.3.2). Em geral a despolarização é de secundária importância comparada com a atenuação por chuva. Contudo, em esquemas de re-uso de frequência a degradação da ligação, por interferência, torna-se significativa.

### 5.2.1 Análise Anual

Nesta secção é feita uma análise à variabilidade anual do XPD, e relacionada com os resultados obtidos para a atenuação no subcapítulo anterior. As distribuições cumulativas do XPD indicam a percentagem de tempo para o qual o XPD é menor que o valor da abcissa.

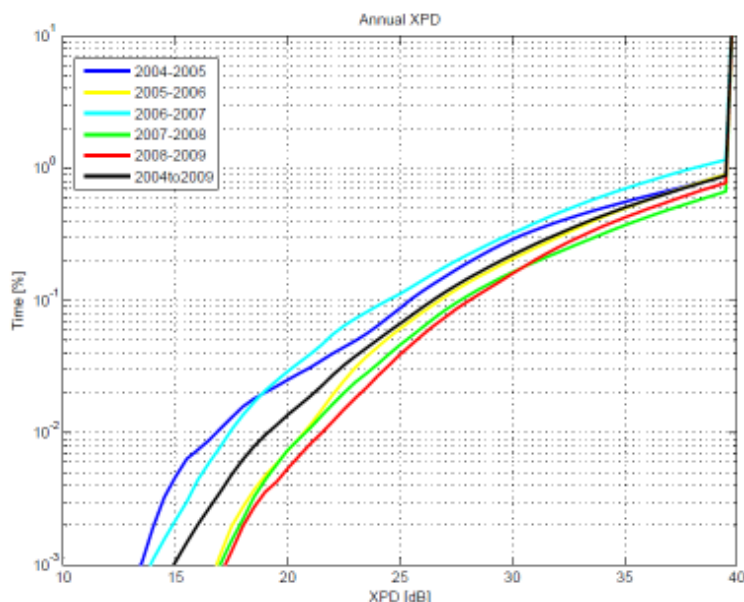


Figura 5-13- Gráfico Anual do XPD

Na figura anterior encontram-se representadas as estatísticas cumulativas anuais do XPD, bem como para o período de 5 anos (2004 até 2009) de dados. De notar que a degradação do XPD é superior no ano de 2006-2007, que é o ano em que a atenuação foi mais intensa.

Tabela 9- Comparação dos valores do XPD com os modelos ITU

Atenuação (dB)	ITU-R P.618-8 XPD s/gelo (dB)	ITU-R P.618-8 XPD total (dB)	XPD 2004-2009 (dB)
2	39.4	34.1	35
5	30.5	27.5	26.2
10	23.7	22	21.7
12	21.9	20.5	20.8
15	19.7	18.7	19.4
17	18.5	17.6	18.7
20	16.9	16.26	17.8
23	15.5	15.1	17

Na tabela 9 é feita uma comparação entre os resultados do XPD e da atenuação, obtidos para o conjunto dos 5 anos de dados, com o modelo ITU-R P.618-8 para o XPD devido à chuva e para o XPD com a contribuição de gelo.

Verifica-se que, para atenuações baixas, os valores obtidos para o XPD não são tão optimistas como os dados pelos modelos, embora sejam quase coincidentes com o modelo previsto com a despolarização por gelo. Para atenuações superiores a 15 dB, os valores do XPD aproximam-se mais do outro modelo, chegando mesmo a ser mais favoráveis que o previsto.

### 5.2.2 Análise mensal

Na figura seguinte encontra-se ilustrada a variabilidade mensal do XPD correspondente a um conjunto de percentagens de tempo definidas.

É notória uma variabilidade mensal bastante elevada. Para a percentagem de tempo mais pequena 0.01% do tempo, o XPD oscila entre os 15 dB em Outubro e os 28 dB em Julho. De notar que os meses que atingiram atenuações mais elevadas, Outubro, Abril e Novembro, foram os mais afectados pelo XPD, cujos valores ficaram aquém dos 20 dB, isto porque um valor superior de XPD é sempre mais favorável.

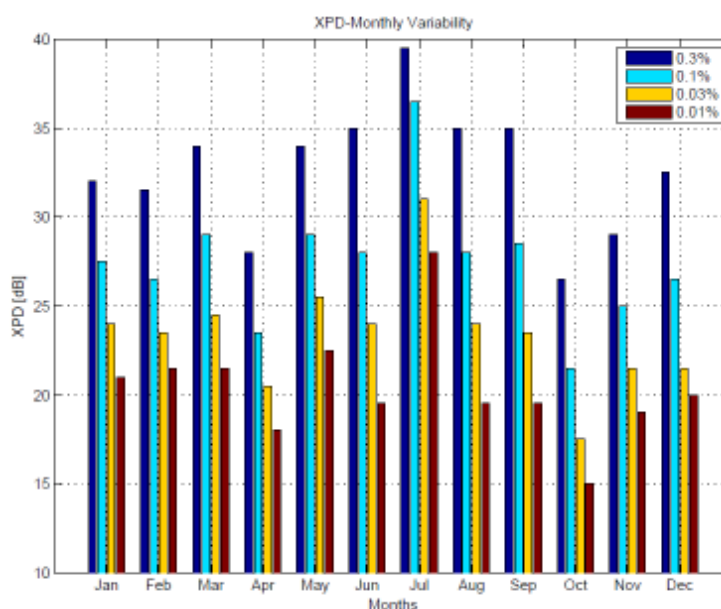
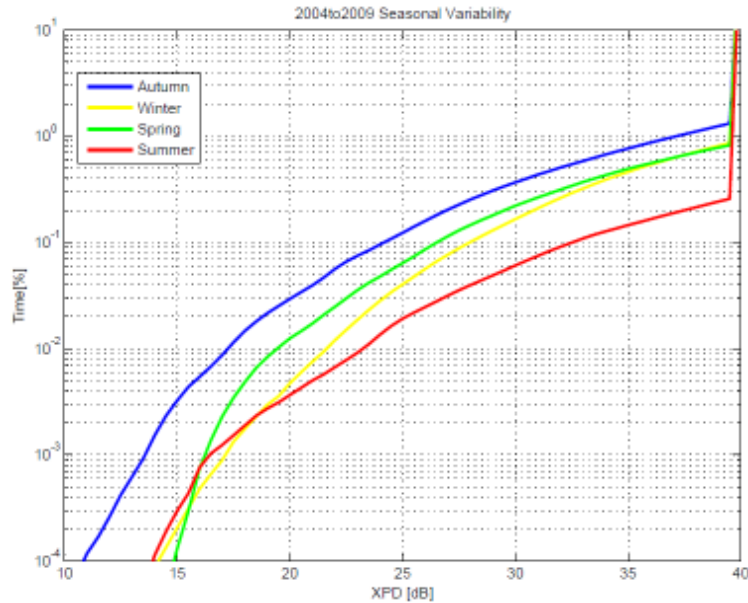


Figura 5-14- Variabilidade mensal do XPD

Pela figura 5-15 é possível analisar sazonalmente o comportamento do XPD. A maior degradação do XPD ocorre para o Outono, como seria de esperar pois é nesta estação que a atenuação é mais intensa. No entanto não se poderá excluir a contribuição do gelo uma vez que ele ocorre nestes meses com forte precipitação.





**Figura 5-15- Distribuição Cumulativa Sazonal do XPD**

É de salientar que apesar do XPD se encontrar relacionado com a atenuação, isto é, quanto maior a atenuação maior a degradação do XPD, o mesmo não se aplica relativamente à influência da taxa de precipitação neste último. Apesar de para atenuações elevadas se considerar uma maior despolarização correlacionada com a precipitação, para atenuações reduzidas, esta encontra-se associada aos eventos de gelo. Contudo esta conclusão é um pouco generalista, pois os efeitos causados pelo gelo e pela chuva no XPD diferem.

A separação da contribuição do gelo e da chuva na despolarização seria um estudo importante na análise do comportamento do XPD e, é de facto um assunto a ser aprofundado no futuro.

## **CONCLUSÃO**



## 6 Conclusões e Trabalho Futuro

Esta tese teve como objectivo a caracterização de alguns fenómenos de propagação e meteorológicos que fazem parte de uma já extensa base de dados recolhida entre Setembro de 2004 e Agosto de 2009.

Inicialmente foi criado software para análise dos dados recolhidos a fim de estudar os fenómenos de propagação/meteorológicos em questão para este trabalho. No primeiro capítulo desta tese foi feita uma introdução ao tema, e foram delineados os passos percorridos na sua realização.

No segundo capítulo foi feita uma familiarização com os parâmetros meteorológicos de relevo, tendo em especial atenção a precipitação e suas consequências.

No terceiro capítulo foram abordados, mais detalhadamente, os fenómenos de propagação e os actuais modelos que os caracterizam, fazendo ainda uma breve referência à atenuação por gases, nuvens e nevoeiro, despolarização e XPD.

No quarto capítulo foi analisada a base de dados, através da caracterização da experiência feita ao longo desta tese.

No quinto capítulo são apresentados os resultados da análise feita à base de dados. Foi estudada a variabilidade anual, sazonal, mensal e diurna da atenuação e da precipitação, fazendo referência ainda à precipitação acumulada ao longo dos 5 anos de dados. No fim deste capítulo foi feita uma breve análise à variabilidade do XPD.

Para estudar a precipitação acumulada, calcularam-se as respectivas estatísticas mensais e, a partir destas, fez-se uma comparação com os valores das normais climatológicas de referência do nosso país (1971-2000), tendo alcançado resultados similares mesmo não conhecendo muito bem as características destes dados de referência.

A partir dos resultados da variabilidade anual da precipitação e dos da atenuação, foi feita uma comparação com os modelos ITU. Os resultados da precipitação aproximam-se mais do modelo ITU-R P.837-4 do que do ITU-R P.837-5, apesar de este último ser mais recente, embora para precipitações superiores os resultados diverjam e fiquem aquém dos valores dos modelos. Relativamente à atenuação, os resultados obtidos encontram-se em concordância com os dados fornecidos pelo modelo ITU-R P.618.8. Mais uma vez verifica-se que o modelo ITU-R P.837-5 apresenta valores em excesso relativamente aos dados medidos, assim como acontecia para a precipitação. Já o modelo ITU-R P.837-4, mais antigo, apresenta valores mais próximos dos recolhidos. Comparando a variabilidade anual da atenuação e da precipitação verificou-se que existia concordância entre os resultados, isto é, os anos com maior atenuação foram os anos mais chuvosos.

Em termos de variabilidade mensal, os meses de Outubro, Novembro e Abril revelaram-se os mais chuvosos e os mais afectados pela atenuação, ao contrário dos meses de Julho e Agosto, em que estes fenómenos quase não se fizeram sentir.

A partir da análise sazonal verificou-se que o Outono (composto pelos meses de Outubro, Novembro e Dezembro), foi a estação com maior atenuação, consequência de ser a mais chuvosa das quatro estações do ano, para o conjunto dos 5 anos de dados. Verificou-se ainda que este comportamento era idêntico para cada ano individual. Por outro lado, o Verão (composto por Julho, Agosto e Setembro) foi a estação mais seca, e com valores de atenuação inferiores. Este resultado era esperado, pois pela análise anterior os meses do Outono eram os mais afectados pela atenuação e os meses do Verão os menos atingidos.

Para a análise diurna da atenuação, escolheram-se intervalos de 2 horas a fim de obter mais estatísticas e resultados mais coerentes. Contudo, analisando anualmente os resultados, verificou-se que estes não eram muito conclusivos nem tinham diferenças marcadas, pois o mesmo intervalo de tempo podia ser o mais seco num certo ano e o mais chuvoso no outro. Então, a fim de obter resultados mais significativos, analisou-se o mês mais chuvoso dos 5 anos (Outubro) e confirmou-se que é durante a tarde que ocorre maior atenuação, assim como precipitação.

Com os resultados anuais obtidos pelo XPD verificou-se que os anos com maior atenuação, foram os que apresentaram piores valores de XPD. Conclui-se então que o XPD se degrada com o aumento da atenuação.

Relativamente ao modelo ITU, verificou-se que para atenuações baixas, os valores obtidos para o XPD são piores que os valores dados pelos modelos, embora sejam quase coincidentes com o modelo previsto com a despolarização por gelo. Para atenuações superiores a 15 dB, os valores do XPD aproximam-se mais do outro modelo, sendo mesmo mais favoráveis que o previsto.

Como trabalho futuro, pode ser acrescentado um novo ano de dados à baliza do satélite Hotbird-6, perfazendo um total de 6 anos de dados em Agosto de 2010, com o intuito de continuar o trabalho desenvolvido até agora. Apesar de 5 anos de dados com resultados serem já considerados como “longterm” e quase um recorde, mais um ano virá estabilizar os resultados e enriquecer o banco de dados do ITU caso venham a ser submetidos como está previsto.

Seria importante tentar separar a contribuição do gelo da contribuição da chuva no XPD, de maneira a prever a influência de cada um no comportamento deste fenómeno e, contribuir para as escassas bases de dados do ITU nesta área.

Uma caracterização dinâmica da atenuação e da discriminação da polarização cruzada, nomeadamente durações, inter-durações, taxa de variação dos desvanecimentos, etc., pode ser desenvolvida e comparada com os modelos existentes e com medidas de outros locais. A análise da dependência destes parâmetros com a estação do ano parece ser bem possível dada a quantidade enorme de eventos já disponível. Em especial o comportamento dinâmico do XPD parece não existir na literatura, sendo por isso uma mais valia estudá-lo.

# **BIBLIOGRAFIA**

## 7 Referências

1. PINO, P.G.D., *Caracterización Experimental de la Propagación a 50 GHz en Trayecto Inclinado*, in *ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN*. 2003, Univ. Politecnica de Madrid: Madrid.
2. DISSANAYAKE, A., *Ka-Band Propagation Modeling for Fixed Satellite Applications*. Online Journal of Space Communication, 2002(2): p. 1-5.
3. KIKKERT, C.J. and O.P. KENNY, *A Digital Signal Processing Based Ka Band Satellite Beacon Receiver*. IEEE, 2008: p. 598-601.
4. PRUPPACHER, H.R. and R.L. PITTER, *A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops*. JOURNAL OF ATMOSPHERE SCIENCE, 1971. 28: p. 86-94.
5. BRUSSAARD, G., *A Meteorological Model for Rain Induced Cross-Polarization*. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, 1976. 24: p. 5-11.
6. Brussaard, G. and P.A. Watson, *Atmospheric modelling and millimetre wave propagation*. 1st ed. 1995, London: Chapman& Hall. 329.
7. MARSHALL, J.S. and W.M. PALMER, *The Distribution of Raindrops with Size*. JOURNAL OF METEOROLOGY, 1948. 5: p. 165-166.
8. TEIXEIRA, R., *Modelos de Cintilação na banda Ka em Trajectória Terra-Satélite*. 2007.
9. ÅSEN, W. and T. TJELTA, *A Comparison of measured Rain Attenuation, Rain Rates and Drop Size Distributions*.
10. FUJIYOSHI, Y., et al., *The Maximum size of Raindrops- Can it be a proxy of Precipitation Climatology?-*.
11. ZHANG, G., J. VIVEKANANDAN, and E. BRANDES, *A Method for Estimating Rain Rate and Drop Size Distribution from Polarimetric Radar Measurements*. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 2001. 39(4): p. 830-841.
12. GUNN, K.L.S. and G.D. KINZER, *The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air*. J. METEOROL., 1949. 6: p. 243-248.
13. ALWARFALLI, A.A.A., *THE EFFECT OF RAINRATE MODELING FOR THE PREDICTION OF SATELLITE PROPAGATION IN MALAYSIA*, in *Faculty of Electrical Engineering*. November, 2005, University Teknologi Malaysia: Malaysia.
14. ITU, *Characteristics of precipitation for propagation modelling*, Rec. 837-5.
15. Mandeep, J.S., *Comparison of Rainfall Models with Ku-Band Beacon Measurement*. Acta Astronautica, 2008. N°64: p. 264-271.
16. Ojo, J.S., M.O. Ajewole, and S.K. Sarkar, *Rain rate and rain attenuation prediction for satellite communication in Ku and Ka bands over Nigeria*.

17. EMILIANI, L.D., et al., *Development of Rain -Attenuation and Rain-Rate Maps for Satellite System Design in the Ku and Ka Bands in Colombia*, in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2004. p. 15.
18. Thurai, M., V.N. Bringi, and A. Rocha, *Specific Attenuation and Depolarization in Rain from 2-Dimensional Video Disdrometer Data*. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2007. 1: p. 373-380.
19. DISSANAYAKE, A.W., *Tese de Doutorado*. 1978, Universidade de Bradford: Inglaterra.
20. *ITU, Propagation data and prediction methods required for the design of Earthspace telecommunication systems. Rec.618-8*.
21. GASPAR, P., *Modelos de Propagação Terra-Satélite na Banda Ka*, in *Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática*. 2008, Universidade de Aveiro: Aveiro.
22. *ITU, Attenuation by atmospheric gases. Rec.676-5*.
23. J. R. Pardo, J.C., E. Serabyn, *Atmospheric Transmission at Microwaves(ATM): An Improved Model for mm/submm Applications*. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 2001.
24. Pedro Garcia, A.B.a.J.M.R., *Spatial distribution of cloud cover*. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SATELLITE COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, 2008: p. 15 (141-155).
25. *ITU-R, Attenuation due to clouds and fog. Rec.840-3*.
26. Asoka Dissanayake, M., IEEE, Jeremy Allnutt, Senior Member, IEEE, and Fatim Haidara, Member, IEEE, *A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and Other Propagation Impairments Along Earth-Satellite Paths*. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 1997. VOL. 45, NO. 10: p. 13 (1546-1558).
27. SALONEN, E. and S. UPPALA, *New prediction method of cloud attenuation*. *ELECTRONIC LETTERS*, 1991. 27(12).
28. IPPOLITO, L.J., *Radiowave propagation in satellite communication*, ed. VAN NOSTRAND REINHOLD CO. 1986.
29. *ITU, Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems. Rec.618-8*.
30. *ITU, Characteristics of precipitation for propagation modelling, Rec 837-4*.
31. *ITU, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, Rec 838-2*.
32. *ITU, Rain height model for prediction methods, Rec 839-3*.
33. MANDEEP, J.S., *Comparison of rainfall models with Ku-band beacon measurement*. *ACTA ASTRONAUTICA*, 2009. 64: p. 264-271.
34. Roddy, D., *Satellite Communnications*. 4th ed, ed. S.S. Chapman. 2006, United States of America: McGraw-Hill Companies, Inc. 636.
35. Kamp, M.M.J.L.v.d., *ON THE DERIVATION OF RAIN ANISOTROPY FROM OLYMPUS BEACON MEASUREMENTS*. *IEEE*, 1995: p. 5 (18-22).

36. Riva, C., *Seasonal and diurnal variations of total attenuation measured with the ITALSAT satellite at Spino d'Adda at 18.7, 39.6 and 49.5 GHz*. INTERNATIONAL JOURNAL OF SATELLITE COMMUNICATIONS, 2004. VOL 22: p. 449-476.
37. Jan Bogucki, E.W., *Rain precipitation in terrestrial and satellite radio links*. Journal of Telecommunications and Information Technology January, 2008: p. 67-71.
38. Singliar, R., et al., *Comparison of Rain Attenuation Models of Satellite Communication Channels based on measured point rain intensity*. 2004.
39. BENARROCH, A., P.G.d. PINO, and V. KVICERA, *Comparison of Rain Rate Statistics Measured in Spain and Prague*. Cost 280, 2002: p. 32.
40. ROGERS, D.V., J. LOUIS J. IPPOLITO, and F. DAVARIAN, *System Requirements for Ka-Band Earth-Satellite Propagation Data*. PROCEEDINGS OF THE IEEE, 1997. VOL. 85, NO. 6: p. 11.
41. Cornelis Jan Kikkert Electrical and Computer Engineering James Cook University Townsville, Q., Australia, *The Design of a Ka band Satellite Beacon Receiver*. IEEE, 2007: p. 5
42. Instituto de Meteorologia, I.P. *Boletins Climatológicos Mensais*. [cited 2009 September]; Available from: [www.meteo.pt/pt/publicacoes/tecnico-cientif/noIM/boletins/](http://www.meteo.pt/pt/publicacoes/tecnico-cientif/noIM/boletins/).
43. Instituto de Meteorologia, I.P. *Evolução do Clima em Portugal em 2005*. 2006 [cited 2009 September]; Available from: [www.meteo.pt/pt/pesquisa/searchresult.jsp](http://www.meteo.pt/pt/pesquisa/searchresult.jsp).
44. Portugal, T.C.d. *Clima Aveiro*. [cited 2009 September]; Available from: [www.turismodocentro.pt/aveiro/index.php?ID=115](http://www.turismodocentro.pt/aveiro/index.php?ID=115).

**ANEXOS**

## Anexo I

Neste anexo são descritos os principais m-files referentes à Atenuação, Taxa de Precipitação e XPD que foram desenvolvidos ao longo desta tese e que deram origem aos gráficos analisados anteriormente.



**Figura Anexo 1- M-files das distribuições cumulativas**

O m-file “DistCum2004to2009.m” calcula as distribuições cumulativas anuais e para o conjunto dos 5 anos. Cria os respectivos gráficos com as curvas referentes a cada ano e com a curva referente aos cinco anos analisados.

O m-file “DistCumBiHor2004to2009” determina as distribuições cumulativas bi-horárias desde 2004 até 2009 e cria os respectivos gráficos sendo que, cada curva representa duas horas do dia (00h-02h...22h-24h).

O m-file “PercentAnuais2004to2009” calcula a variabilidade de cada um dos fenômenos para percentagens pré-definidas e cria o gráfico respectivo.



**Figura Anexo 2- M-files dos mesmos meses do ano**

O m-file “DistCumSameMonth.m” permitiu calcular as distribuições cumulativas para os mesmos meses dos cinco anos referentes à Atenuação, Taxa de Precipitação e XPD e criar os respectivos gráficos.

O m-file “DistCumSameMonthBiHor.m” é semelhante ao m-file anterior mas analisa os dados de forma bi-horária.

O m-file “percentagens.m” calcula a variabilidade da Atenuação, Taxa de Precipitação e XPD para os mesmos meses dos cinco anos para percentagens previamente definidas e cria os respectivos gráficos.

O m-file “PrecipitacaoAcumulada.m” determina a acumulação da precipitação (mm) para os mesmos meses dos cinco anos de dados e cria o gráfico correspondente.







**Figura Anexo 3- M-files das estações do ano**

Com o m-file “DistCumEstacoes2004to2009.m” foi possível determinar as distribuições cumulativas das estações do ano e criar os gráficos de cada uma delas separadamente, para cada um dos cinco anos de dados.

O m-file DistCumSeason.m calcula as distribuições cumulativas das estações do ano e acumula-as desde 2004 até 2009 apresentando os resultados sob a forma de gráficos.

O m-file “DistCumEstacoesTotalBiHoraria.m” determina o mesmo que o m-file anterior, mas com uma análise bi-horária.

O m-file “PercentEstacoesTotais.m” calcula a variabilidade sazonal de cada um dos fenômenos estudados para percentagens previamente definidas e cria o respectivo gráfico.



**Figura Anexo 4- M-file da precipitação acumulada**

O m-file “PrecipitacaoAcumuladaAnual.m” calcula a acumulação da precipitação (mm) para cada um dos cinco anos de dados, criando o gráfico correspondente.

## Anexo II

Nesta secção são apresentados os resultados das medições de atenuação noutros locais e que serviram de comparação aos resultados obtidos nesta tese.

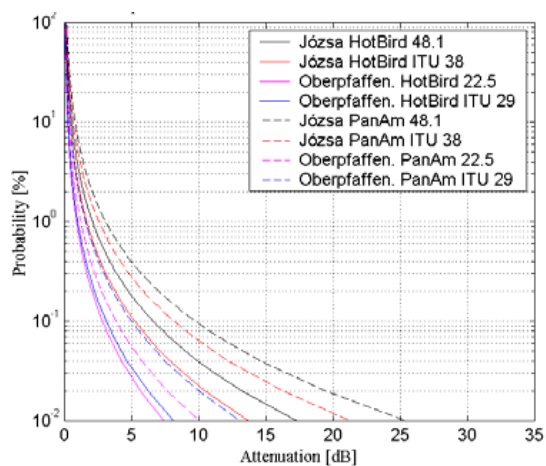
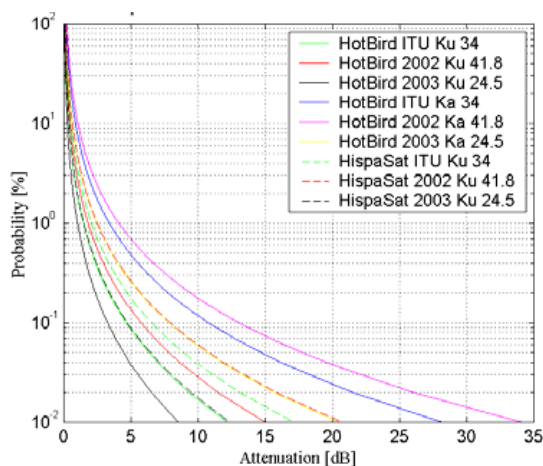
A tabela seguinte enuncia os parâmetros de comparação:

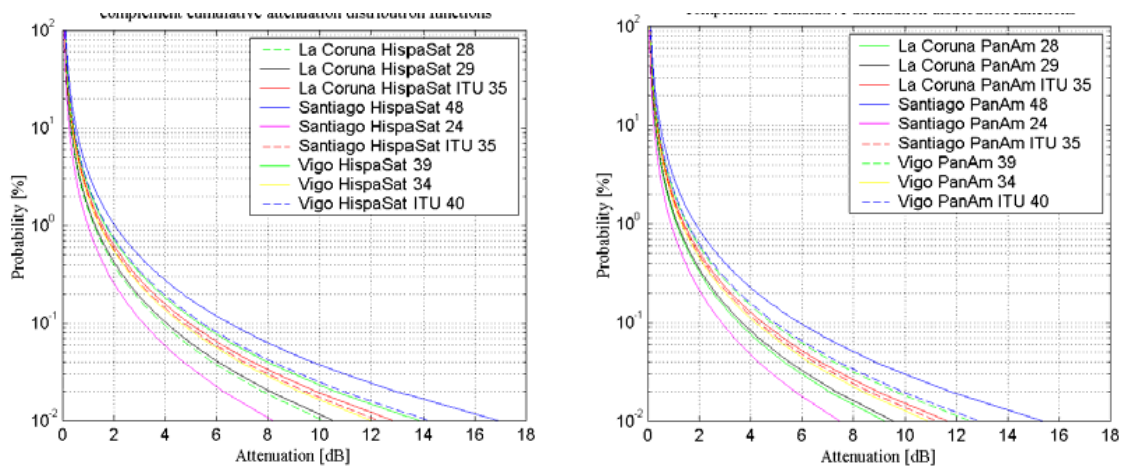
**Tabela Anexo 1- Parâmetros dos satélites usados em medições de outros locais**

Satélites	Ângulo de Elevação (°)	Frequência (GHz)
HotBird	35.42	12.539 e 19.842
HispaSat	18.06	12.662
PanamSat	8.70	11.510
Lucz 1	22	18.6
ItalSat	37.7	18.7

Os gráficos seguintes apresentam as distribuições cumulativas para Budapeste, Józsa, Oberpfaffenhofen e, La Coruña, Santiago de Compostela e Vigo [38].

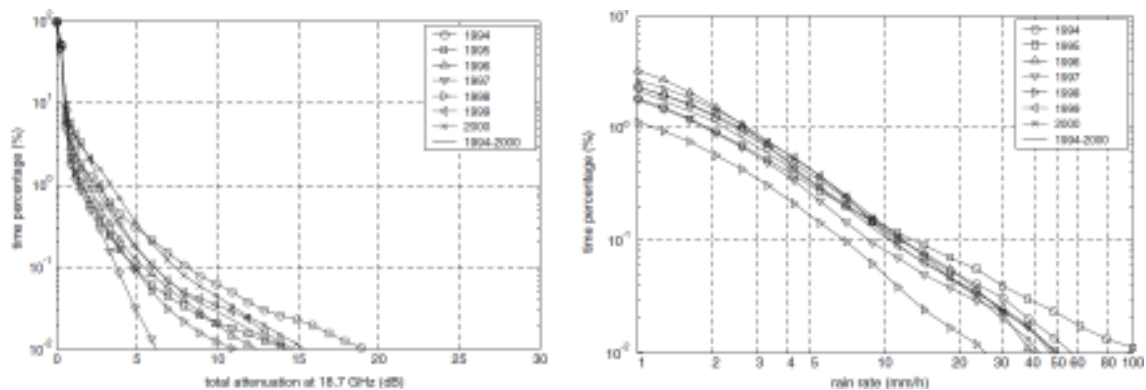
De notar que os números que se encontram nas legendas representam as respectivas taxas de precipitação excedidas para 0.01% do tempo.





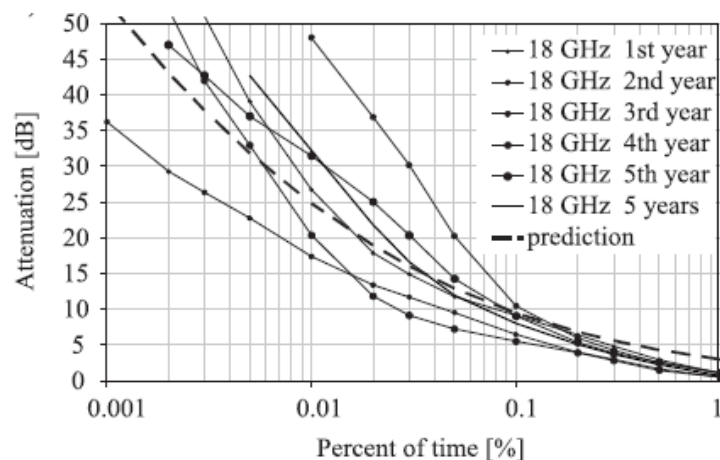
**Figura Anexo 5- Distribuições cumulativas de Atenuação para Budapeste, Józsa, Oberpfaffenhofen, La Coruña, Santiago de Compostela e Vigo**

A figura seguinte apresenta a distribuição cumulativa da atenuação para Spino d'Adda, Itália durante uma campanha experimental que durou 7 anos (1994 até 2000).



**Figura Anexo 6- Distribuição Cumulativa da Atenuação e Taxa de Precipitação em Spino d'Adda**

A figura seguinte apresenta as distribuições anuais da atenuação por chuva, para um período de 5 anos, medidas na Polónia.



**Figura Anexo 7- Distribuição Cumulativa da Atenuação na Polónia**